



HAL
open science

Pier Luigi Nervi, l'architecture biomimétique avant la lettre ?

Louis Vitalis

► **To cite this version:**

Louis Vitalis. Pier Luigi Nervi, l'architecture biomimétique avant la lettre?. [Rapport de recherche] MAP - Modèles et simulations pour l'Architecture et le Patrimoine. 2021. hal-03359251

HAL Id: hal-03359251

<https://hal.science/hal-03359251v1>

Submitted on 30 Sep 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

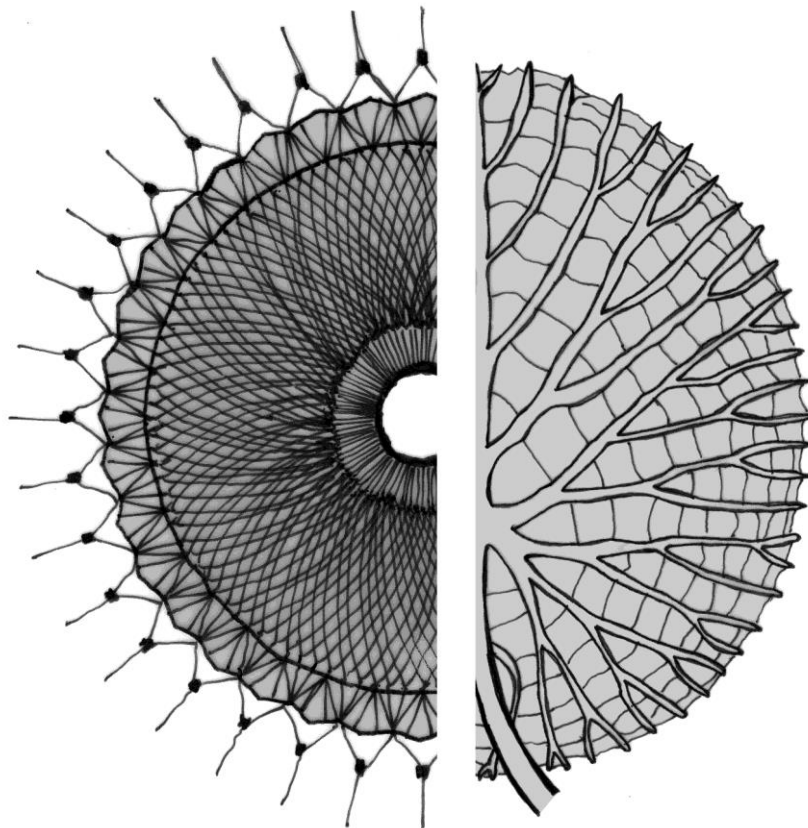
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Pier Luigi Nervi, l'architecture biomimétique avant la lettre ?

Rapport de recherche

Bourse André Chastel

Septembre 2021



Louis Vitalis
ENSA - La Villette
louis.vitalis@paris-lavillette.archi.fr

Je souhaite remercier l'Académie de France à Rome - Villa Médicis et l'INHA pour l'accueil et le soutien à cette recherche, ainsi que les archives de la Fondazione MAXXI pour l'aimable mise à disposition du fond Pier Luigi Nervi.

(Couverture : Palazzetto dello sport vs. nénuphar Victoria Amazonica, dessin L. Vitalis)

Sommaire

I. Introduction : récupération ou avant-garde de Pier Luigi Nervi ?	4
II. Deux histoires de Pier Luigi Nervi : biomimétisme vs modernisme constructif	6
III. La piste philologique : les sources des biomiméticiens.....	10
IV. La piste phylogénétique : les lignées de conception des projets.....	20
V. La piste épistémique : les connaissances biologiques de Pier Luigi Nervi.....	39
VI. Retour sur les projets dits biomimétiques de Pier Luigi Nervi.....	52
Annexe 1 : photos de diatomées envoyées à Pier Luigi Nervi.....	54
Bibliographie.....	58

Résumé : On trouve dans les discours sur l'architecture biomimétique plusieurs mentions des édifices de Pier Luigi Nervi. Or, le travail de l'ingénieur italien précède de plusieurs dizaines d'années l'émergence du mouvement du biomimétisme en architecture et ses principaux livres ne mentionnent pas lorsqu'ils parlent de conception d'éventuelles références prises dans la biologie. Pour comprendre si Pier Luigi Nervi a pu être un précurseur du biomimétisme l'enquête est menée sur trois plans : (1) sur les sources des auteurs du biomimétisme, (2) sur les processus de conception des projets et, en particulier, sur l'invention et l'évolution des structures isostatiques, (3) sur les savoirs biologiques éventuellement possédés par Pier Luigi Nervi. Les résultats montrent que le tissu spongieux des os a pu être un modèle pour sa conception des dalles à nervures isostatiques, mais qu'il est insuffisant pour expliquer la richesse de leurs mises en œuvre. Un ensemble d'affirmations quant au biomimétisme de Pier Luigi Nervi semble alors reposer sur des analogies *a posteriori* ou des métaphores non analysées.

Mots-clés : architecture biomimétique, architecture moderne, histoire de l'architecture, biologie, structures isostatiques, conception architecturale

Abstract : There are several mentions of Pier Luigi Nervi's buildings in the literature on biomimetic architecture. However, the work of the Italian engineer precedes the emergence of the biomimetic movement in architecture by several decades and his main books do not mention any design references taken from biology. To understand whether Pier Luigi Nervi could have been a precursor of biomimicry the investigation is conducted on three levels: (1) on the sources of the authors of biomimicry, (2) on the design processes of the projects and in particular on the invention and evolution of isostatic structures, (3) on Pier Luigi Nervi's possible biological knowledge. The results show that the trabecular of cancellous bones may have been a model for the design of isostatic ribbed slabs, but that it is insufficient to explain the variety of its implementations. Thus, a whole set of assertions about Pier Luigi Nervi's biomimicry seems to be based on retrospective analogies or unanalyzed metaphors.

Keywords : Biomimetic architecture, modern architecture, history of architecture, biology, isostatic structures, architectural design

I. Introduction : récupération ou avant-garde de Pier Luigi Nervi ?

Pier Luigi Nervi (1891-1979), ingénieur de formation, a significativement contribué au champ de l'architecture par son travail sur les formes structurelles et les techniques de construction. Son œuvre est conséquente. Elle peut être étudiée sous plusieurs aspects, et elle l'est déjà d'ailleurs par de nombreux chercheurs. L'entrée de ce travail est relativement restreinte. Elle est suscitée par les discours que la communauté du mouvement de l'« architecture biomimétique » tient sur le travail de Pier Luigi Nervi. C'est donc seulement à partir de ce point de vue que procédera cette étude et donc aussi sa limite.

Des inspirations directes et libres de la nature ont toujours nourri la conception architecturale (voir par exemple Portoghesi, 1999). L'architecture biomimétique contemporaine revendique cependant une certaine différence. Il est possible d'identifier, selon moi, deux traits distinctifs sur lesquels cette différence se fonde : la biologie et l'écologie¹.

— Le recours à la biologie signifie que le rapport à la nature est indirect. La biologie suppose une médiation, celle de la science. Ainsi les concepteurs d'architectures biomimétiques sont supposés avoir recours à des sciences biologiques pour leurs projets. Plutôt que d'observer eux-mêmes, en amateurs, des organismes vivants, ils s'appuient sur les connaissances élaborées par les biologistes. Les développements de pointe des sciences contemporaines du vivant sont censés fournir un apport significatif dans les projets d'architecture biomimétique.

— L'intention écologique associée aux projets d'architecture biomimétique est la marque d'une prise de conscience historique des ressources naturelles limitées et de l'impact écologique des constructions humaines. Ainsi les architectures biomimétiques sont investies d'une mission de développement durable qui peut s'incarner selon les différentes facettes de cette notion : les ressources matérielles nécessaires à la construction, la consommation d'énergie nécessaire à l'exploitation du bâtiment, l'insertion dans des écosystèmes existants, etc.

C'est au nom de ces deux conditions, que le biomimétisme contemporain se positionne comme étant en rupture avec les expériences architecturales passées inspirées par la nature et ses formes organiques. La prise de conscience écologique qui s'est généralisée à la suite du premier rapport du club de Rome en 1972 et de la crise pétrolière de 1973, de même que la croissance des savoirs de plus en plus spécialisés et l'engouement des politiques de recherches pour l'interdisciplinarité sont tous deux des phénomènes historiques. C'est sur ces transformations historiques que le biomimétisme s'appuie pour se dire innovant.

Or cette idée contemporaine d'un biomimétisme associant sciences du vivant et durabilité n'apparaît qu'à la fin des années 90 (voir le best-seller : Benyus, 1997/2002). Son application à l'architecture, d'où découle l'idée d'une « architecture biomimétique », émerge au tournant des années 2010 (Gruber, 2011; Pawlyn, 2011; Mazzoleni, 2013; Pohl & Nachtigall, 2015). C'est donc plus de trente ans après le décès de Pier Luigi Nervi que ces auteurs, situés dans une perspective d'innovation, sont venus poser un regard différent sur son œuvre. D'après eux, Pier Luigi Nervi se serait inspiré de différents organismes naturels pour concevoir ses projets et serait ainsi un concepteur précurseur de l'architecture biomimétique.

¹ La récurrence de ces deux traits distinctifs dans la littérature biomimétique en est le signe (à titre indicatif voir Gruber, 2011; Pawlyn, 2011; Mazzoleni, 2013; Pohl & Nachtigall, 2015) .

Or cette idée d'un Pier Luigi Nervi s'adonnant à des processus de conception biomimétique est à la fois troublante et pleine d'espoir. *Troublante*, parce qu'à première vue cela ne correspond pas à ce que l'on a retenu de l'architecture de Pier Luigi Nervi. Mais les changements d'interprétations des œuvres ne sont ni impossibles, ni problématiques en tant que tels. Ils sont monnaie courante dans l'histoire de l'histoire. *Pleine d'espoir* parce que les textes d'architecture biomimétique se confinent à un ton spéculatif, plein de promesses pour un futur innovant : le fait que des œuvres réalisées existent et qu'une carrière de constructeur ait pu se fonder sur le biomimétisme rassure. Pier Luigi Nervi serait la caution qu'une authentique architecture biomimétique complexe est effectivement possible. C'est donc sur cette possibilité d'une architecture biomimétique avant la lettre que porte la présente enquête.

Le point de départ est donc un double regard porté sur les architectures de Pier Luigi Nervi : d'un côté les discours biomimétiques, de l'autre les recherches nerviennes portant sur la modernité constructive. Pour élucider cette situation de décalage, l'enquête s'est basée sur l'étude des archives de l'agence de Pier Luigi Nervi, fond se trouvant au Centro Archivi de la Fondazione MAXXI (ci-après Centro Archivi MAXXI), de brevets se trouvant à l'Archivio Centrale dello Stato, et d'archives (privés) d'Aldo Arcangeli, un des collaborateurs de Pier Luigi Nervi. Des recherches dans les bibliothèques de Rome et de Paris ont permis de retrouver de nombreux textes anciens et récents, issus de journaux d'architecture et de travaux académiques, concernant les projets de Pier Luigi Nervi. Enfin, une prise de contact avec Elisabetta Margiotta Nervi de l'association *Pier Luigi Nervi Research and Knowledge Management Project*, complète ces sources.

L'enquête retranscrite ici est menée sur trois plans : celui de l'origine des discours biomimétiques, celui des lignées de projets conçus et de leurs continuités, celui des savoirs biologiques de Pier Luigi Nervi. Elle est ainsi remontée à de multiples sources dont plusieurs ancrées dans le champ de la « bionique » qui fait figure d'ancêtre du biomimétisme. Elle a retracé toute une histoire des dalles à nervures isostatiques imaginées par Pier Luigi Nervi et ses collaborateurs et qui ont probablement quelque chose à voir avec le tissu spongieux des os. Elle a découvert l'existence d'une correspondance entre Pier Luigi Nervi, Frei Otto et le biologiste Johan-Gerhard Helmcke au sujet de micro-algues, les diatomées. Pourtant aucune preuve significative en faveur d'une inspiration d'un organisme naturel pour la conception d'un projet d'architecture particulier n'a été mise à jour. À la lumière de ce travail, un ensemble d'allégations de biomimétisme semble alors reposer sur des analogies établies *a posteriori* et sur des ressemblances formelles qui tiennent mal compte du contexte et des processus de conception menés par l'ingénieur-architecte italien.

II. Deux histoires de Pier Luigi Nervi : biomimétisme vs modernisme constructif

Pour situer le problème, il convient de rapporter d'abord deux ensembles de discours tenus à propos de l'architecture de Pier Luigi Nervi. D'un côté les présomptions de biomimétisme chez Pier Luigi Nervi, d'un autre côté ce que disent Pier Luigi Nervi et les chercheurs spécialistes de son œuvre. Ce sont deux histoires parallèles qui se dessinent.

Des projets biomimétiques

Dans la littérature biomimétique largement diffusée, celle des livres plusieurs fois édités et traduits, le biomimétisme de Pier Luigi Nervi implique essentiellement trois édifices : d'abord, le Palazzetto dello sport (1956-1957²), petit palais des sports situé à Rome dans le quartier Flaminio, conçu avec l'architecte Annibale Vitellozzi pour les Jeux olympiques de 1960 ; ensuite, le Lanificio Gatti (1951-1953), usine de laine, conçu avec l'ingénieur Cestelli Guidi Carlo et situé dans la périphérie de Rome sur la via Prenestina ; enfin, le CNIT (Centre des nouvelles industries et technologies) dans le quartier de La Défense à Paris , conçu avec les architectes Robert Camelot, Jean de Mailly et Bernard Zehrfuss qui y travaillent depuis 1950. Pier Luigi Nervi est invité pour travailler à l'étude de la structure entre 1953 et 1956, mais son étude ne sera pas retenue et la collaboration s'arrêtera avant la réalisation du projet.

D'après l'architecte britannique Michael Pawlyn, Pier Luigi Nervi, après avoir étudié de près des structures biologiques, aurait exploré plusieurs stratégies pour la conception de ses coques minces. Les nervures structurelles de la coupole du Palazzetto dello sport reprennent, selon lui, un principe des feuilles du nénuphar géant, *Victoria Amazonica*, raidissant des surfaces minces par des nervures sous-jacentes (Pawlyn, 2011, p. 19).

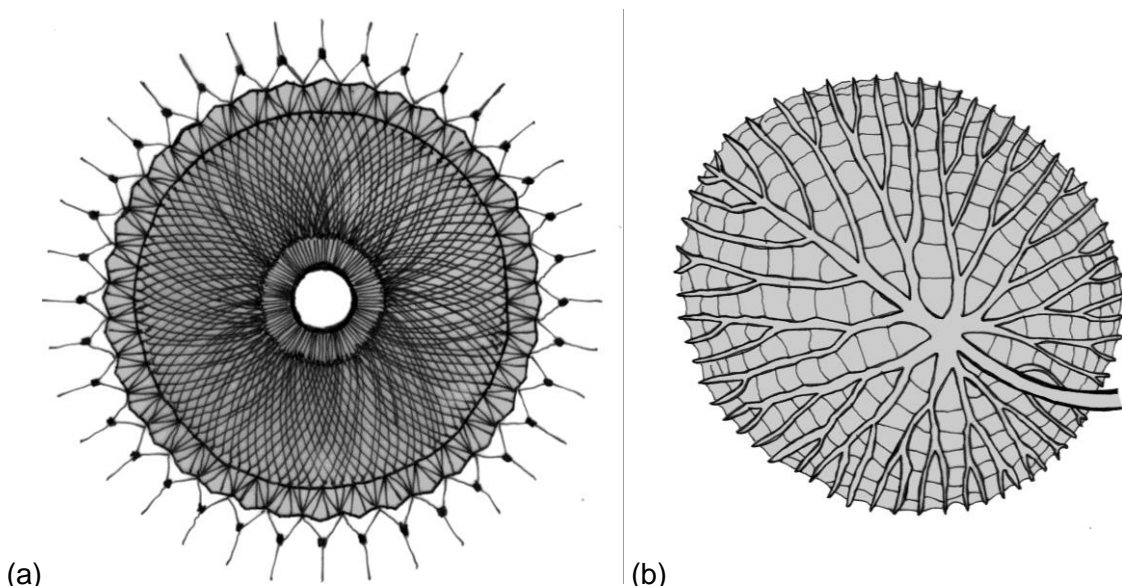


Figure 1 — (a) le plan de la coupole du Palazzetto dello sport (dessin L.Vitalis), (b) dessous d'une feuille de *Victoria Amazonica* (dessins L. Vitalis d'après (a) : Nervi & Bartoli ; (b) Pawlyn, 2011, p. 8)

² Sauf indication particulière, les dates entre parenthèses correspondent à celles des documents conservés au Centro Archivi MAXXI et indiquent donc la période d'activité de l'agence sur le projet.

L'architecte et chercheuse Petra Gruber cite également dans son ouvrage majeur le Palazetto dello sport pour la répartition des charges transmises du réseau de la coupole jusqu'aux appuis en « V » sans préciser à quel organisme naturel il emprunte ses formes ou ses principes. Elle place cependant l'œuvre de Pier Luigi Nervi dans la lignée du Cristal Palace de John Paxton inspiré lui aussi d'un nénuphar (Gruber, 2011, p. 65). Petra Gruber associe Pier Luigi Nervi seulement au groupe des analogies constructives qui n'empruntent que certains aspects à la nature, en particulier ceux associés aux descentes de charges. Elle cite à la suite le Lanificio Gatti sans préciser un organisme naturel duquel il serait redevable.

Pour l'architecte et enseignant Göran Pohl et le biologiste Werner Nachtigall, le Palazzetto dello Sport est le fruit d'une analogie avec une micro-algue unicellulaire, la diatomée *Arachnoidiscus*, une espèce de diatomée ayant une organisation à symétrie centrale (Pohl & Nachtigall, 2015, p. 135). Si les auteurs expriment toutefois un doute sur l'intentionnalité de l'analogie, ils estiment que la similitude est probablement voulue.

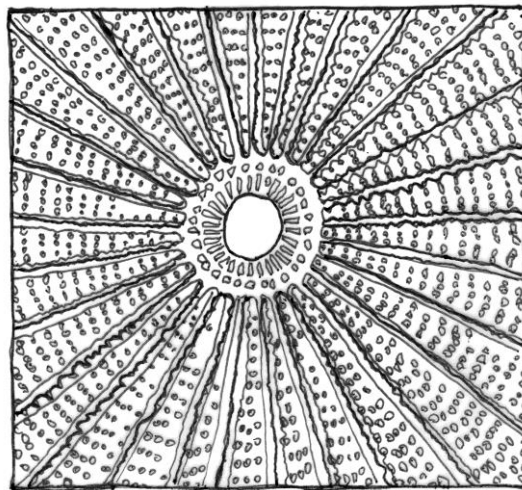


Figure 2 — Diatomée *Arachnoidiscus* (dessin L.Vitalis d'après Pohl & Nachtigall, 2015, p.135)

Göran Pohl et Werner Nachtigall indiquent que les nervures des planchers du Lanificio Gatti sont inspirées de l'étude de la structure du tissu spongieux des os, appelé aussi trabéculaire. Les lignes des nervures ont la particularité de suivre les trajectoires des efforts (Pohl & Nachtigall, 2015, p. 155-156). Les auteurs font référence aux planchers du sous-sol semi-enterré de l'édifice. Michael Pawlyn s'accorde avec cette idée tout en lui donnant une valeur générale pour l'œuvre de Pier Luigi Nervi, affirmant : « his structures capture both muscular and skeletal qualities » (Pawlyn, 2011, p. 19). Le Lanificio Gatti n'est qu'un exemple pour lui.

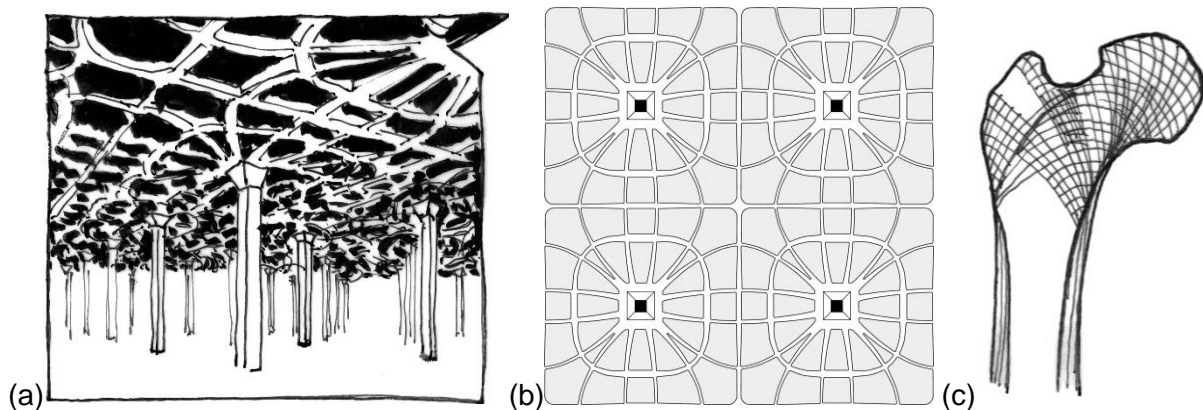


Figure 3 — (a) vue et (b) plan du plancher à nervures du Lanificio Gatti (d'après Nervi, 1965a, p.66-67), (c) lignes de disposition des structures du tissu spongieux d'un os (dessins L. Vitallis, d'après (a, b) : Nervi & Bartoli ; (b) : Pawlyn, 2011, p 20)

Toujours d'après Göran Pohl et Werner Nachtigall, la structure proposée par Pier Luigi Nervi pour le CNIT serait inspirée d'organismes unicellulaires que sont les radiolaires et en particulier de l'espèce *Callimitra* et de leurs réseaux tétraédriques (Pohl & Nachtigall, 2015, p. 146, 151).

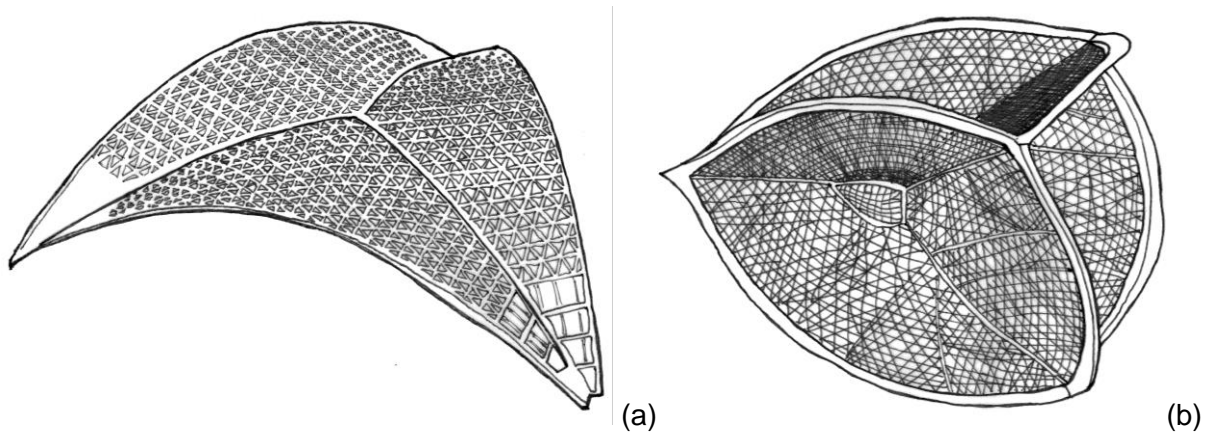


Figure 4 — (a) étude de Pier Luigi Nervi pour le CNIT, (b) radiolaire *Callimitra* (dessins L.Vitalis, d'après (a) : Pier Luigi Nervi ; (b) Pohl & Nachtigall, 2015, 146)

Ces différents ouvrages, traitant les projets de Pier Luigi Nervi comme des projets biomimétiques, font référence dans le domaine. Certains sont largement repris et cités. À la suite de Michael Pawlyn, par exemple, des chercheurs (Oliveira et al., 2019), des étudiants de master (Stals, 2014, p. 44; Jain, 2020, p. 14), ou des sites grands publics³, répètent, sans la soumettre à une enquête critique, l'idée que Pier Luigi Nervi se serait inspiré de la feuille de nénuphar pour concevoir la coupole du Palazzetto dello sport. D'autres auteurs, tout en s'appuyant sur ces sources, restent plus précautionneux. Matteo Baldissara, dans sa thèse, insiste sur le fait que l'inspiration « n'est pas explicitée » et, même si elle est « probable », le processus de conception « n'est pas connu » (Baldissara, 2018, p. 59 [t.d.a.]).

Des projets biomimétiques ?

Là où ces discours deviennent étonnants, c'est lorsqu'ils sont mis en parallèle avec ce que dit Pier Luigi Nervi de ses projets ou avec ce que les chercheurs spécialistes de son travail ont mis à jour.

En effet, on ne trouve pas dans les principaux textes publiés par Pier Luigi Nervi, de traces de ces inspirations d'organismes naturels ; ni dans son premier livre (Nervi, 1945), ni dans le suivant (Nervi, 1955/1997)⁴, ni dans les Charles Eliot Norton lectures qu'il donna en 1961-1962 (Nervi, 1965a), ni dans son livre *Nuove strutture* (Nervi, 1963a).

Ces organismes naturels — nénuphars, micro-algues, organismes unicellulaires, os — à partir desquels Pier Luigi Nervi se serait inspiré dans ses processus de conception, ne sont

³ Voir par exemple : « How to Get Inspired by Nature to Create Architecture? » <https://pangaeaproject.org/how-to-get-inspired-by-nature-to-create-architecture/>, consulté le 30 juillet 2021), « The 5 Great Biomimicry Applications Series – Plants 4 » (<https://biomimicron.wordpress.com/2012/11/23/the-5-great-biomimicry-applications-series-plants-4/>, consulté le 30 juillet 2021).

⁴ Intitulé *Costruire correttamente: caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate* lors de sa publication originale en 1955, il est traduit en anglais sous le titre *Structures* en anglais, puis en Français sous le titre *Savoir construire* en 1997.

pas non plus mentionnés par les chercheurs spécialistes et exégètes de son œuvre. Les travaux de recherche se concentrent en effet sur d'autres thèmes. Il y est question de la notion d'architecture structurelle comme la conjonction indivisible d'une réflexion spécifique sur des notions spatiales et esthétiques propres à l'architecture, associé à une réflexion technico-constructive (Castelli & Del Monaco, 2011) ; mais aussi des expérimentations sur les matériaux et les techniques constructives comme la préfabrication (Iori, 2009) et les brevets qu'il a déposés (Greco, 2008; Iori, 2012) ; ou encore de l'enseignement de la construction et de la place de Pier Luigi Nervi dans l'histoire de l'ingénierie italienne et de ses universitaires (Trentin & Trombetti, 2010) ; on trouve enfin des recherches portant sur son travail de modélisation par des mesures sur maquettes chargées (Neri, 2014).

Ce décalage avec les présupposés biomimétiques est donc déroutant, puisque l'on est face à deux histoires de Pier Luigi Nervi qui sont sans rapport. Il faut cependant mentionner quelques éléments qui viennent nuancer ce tableau. Sans pour autant confirmer les analogies naturelles précitées, ils viennent indirectement évoquer leur possibilité. Paolo Portoghesi rapporte, des enseignements qu'il a reçus de Pier Luigi Nervi, les références qu'il faisait aux organismes naturels, non pas comme modèle pour concevoir des projets, mais pour transmettre des notions statiques et en donner aux étudiants l'intuition (Portoghesi et al., 2011, p. 186).

Ana Irene del Monaco développe, parmi les thématiques de recherches nerviennes émergentes, la question des rapports entre architecture et nature qui interroge à la fois la relation entre la pensée de Pier Luigi Nervi et celle d'auteurs classiques comme Laugier ou Gottfried Semper, mais aussi les héritiers de Pier Luigi Nervi comme Michael Weinstock professant un « Biological Paradigm for Architecture » à l'Architectural Association de Londres. Ces quelques pistes sont pourtant loin de confirmer les propos de la communauté de l'architecture biomimétique.

Pour clarifier cette situation de décalage pouvant sembler contradictoire, il est nécessaire d'enquêter au moins sur trois pistes :

- une piste *philologique* : d'où les discours du biomimétisme tiennent-ils leurs sources ?
- une piste *phylogénétique* : dans quel processus de conception s'insèrent les édifices cités ?
- une piste *épistémique* : de quelles connaissances biologiques Pier Luigi Nervi disposait-il ?

III. La piste philologique : les sources des biomiméticiens

Le travail philologique de cette partie qualifie une remontée aux sources, aux références des références sur lesquelles s'appuient les discours du biomimétisme de Pier Luigi Nervi. Il s'agit de voir sur quels ouvrages ou publications elles se basent, explicitement ou non, et de tenter de repérer les changements de sens qui ont pu s'opérer au cours de l'histoire de cette littérature. La question ici est de savoir à quand et à quels univers référentiels remontent ces associations des architectures de Pier Luigi Nervi à des organismes naturels.

En remontant vers les sources plus anciennes, on assiste à plusieurs changements de contexte, et notamment des contextes historiques de travaux où le biomimétisme au sens qu'il a pris depuis les années 2010 en architecture, n'avait pas cours. Ainsi, c'est le sens même de l'association des édifices de Pier Luigi Nervi à des organismes naturels qui est dévié.

De la biologie aux généralités sur la nature

En plaçant le Palazzetto dello sport de Pier Luigi Nervi à la suite de l'exemple du Cristal Palace de John Paxton inspiré d'un nénuphar, Petra Gruber peut donner au lecteur une impression de continuité qui peut être interrogé. Mais en faisant cela, elle reproduit une séquence discursive que Paolo Portoghesi avait déjà empruntée. Paolo Portoghesi, que Petra Gruber connaît pour s'y référer plusieurs fois, avait antérieurement cité Pier Luigi Nervi, parmi d'autres architectes et ingénieurs, après avoir également mentionné le Cristal Palace inspiré par la feuille de *Victoria regia*, autre nom du même nénuphar géant. Cependant, Paolo Portoghesi ne cite aucun bâtiment de Pier Luigi Nervi en particulier dans ce passage (Portoghesi, 1999, p. 286).

En d'autres endroits, Paolo Portoghesi établit un parallèle entre les voûtes fines de Pier Luigi Nervi, en général, et les nids réalisés à partir de surfaces pliées par différents animaux, dont les fourmis *Oecophylla* et le passereau *Remiz pendulinus* (Portoghesi, 1999, p. 175).

Or, le travail de Paolo Portoghesi sur les relations entre architecture et nature n'a pas de lien direct avec l'idée de biomimétisme. Il établit des analogies à partir de formes archétypales et réinterprète ainsi de nombreux exemples de l'histoire de l'architecture ancienne et récente, telle la feuille d'acanthé sur le chapiteau corinthien. Paolo Portoghesi ne se soucie ni de la biologie ni de l'écologie, sa démarche est plutôt historique ou esthétique. Il ne prétend pas que les analogies aient été des moteurs effectifs lors de la conception des projets. C'est une interprétation qui cherche à nourrir la pensée architecturale.

Ainsi, Michael Pawlyn dans une des seules source qui étaye son propos au sujet de Pier Luigi Nervi indique que ses structures « capture both muscular and skeletal qualities » (Pawlyn, 2011, p. 19). Il s'appuie sur la citation suivante :

« "The very fact of not having at its origin a form of its own ... permits it to adapt itself to any form and to constitute resisting organisms". He viewed reinforced concrete as "a living creature which can adapt itself to any form, need or stress" »

Michael Pawlyn reprend ici les « Considerations on the Architecture of Our Time », la transcription d'une Leconfield-lecture de Pier Luigi Nervi à la British Italian Society en 1963 se trouvant aux archives de la British Architectural Library, Portland Place à Londres. Mais cette idée du béton qualifié de vivant est reprise à quelques mots près dans l'un de ses

ouvrages précédents (Nervi, 1945, p. 13-14). Pier Luigi Nervi ayant pour habitude de reprendre les mêmes textes en ne faisant que varier certains aspects mineurs, cela donne un aperçu probable de ce que Pawlyn a pu consulter. L'étude montre que le qualificatif « vivant » attribué au béton semble chez Pier Luigi Nervi largement métaphorique. Pier Luigi Nervi ne se réfère ni à un être vivant en particulier ni à un comportement d'être vivant ni à une théorie des sciences du vivant. C'est le mouvement et l'imprévisibilité des structures en béton armé pendant et après coulage que constate Pier Luigi Nervi et qui pour lui, peut être exprimé par l'image du vivant comme nous le verrons ci-après⁵.

L'historien de l'architecture moderne Joseph Abram, donne accès à une autre ligne référentielle. Bien que son propos ne soit ni le biomimétisme ni les inspirations à partir d'organismes naturels il évoque ces questions à partir de deux sources, les interprétations de Rudolf Arnheim (Abram, 2018) et les planches du livre de André Hermant *Formes utiles* (Abram, 2010, p. 52). D'après Joseph Abram, l'animalité de l'architecture de Pier Luigi Nervi serait nécessaire, car remplissant un rôle symbolique en signifiant la structure au-delà de sa pure caractéristique constructive. Il se base sur la conception du symbolisme du psychologue et théoricien des arts, Rudolf Arnheim (1904-2007). Il faut remarquer que l'ouvrage de Rudolf Arnheim, *Dynamique de la forme architecturale* (Arnheim, 1977/1986), n'a pas pour objet la conception, mais la perception et l'apparence visuelle de l'architecture. La « dynamique » en question est celle de l'acte de percevoir et la « forme » est entendue au sens de la *gestalttheorie* (psychologie de forme). Il ne s'agit pas de processus de conception ni de typo-morphologie architecturale. De plus, le seul passage de ce livre rapportant l'architecture de Pier Luigi Nervi à des formes organiques est plutôt indirect. Discutant de l'impact visuel de l'ornementation architecturale dans la perception de l'ensemble Rudolf Arnheim mobilise une analogie entre les cannelures d'une église gothique ou d'un stade de Pier Luigi Nervi (sans préciser lequel) et du feuillage du chapiteau d'une colonne corinthien (Arnheim, 1977/1986, p. 247). Autrement, Pier Luigi Nervi apparaît au sujet des notions de symétrie et de dynamique visuelle (Arnheim, 1977/1986, p. 58-59), de la marge de liberté de l'architecte pour créer des formes perçues comme belles (Arnheim, 1977/1986, p. 252) et du symbolisme spontané du stade municipal de Florence (Arnheim, 1977/1986, p. 261-262). Ici on se place dans un domaine d'interprétation de Pier Luigi Nervi qui est à l'articulation entre esthétique et psychologie, où la psychologie de la forme explore le fonctionnement cognitif des arts visuels. Les organismes naturels ne sont plus les objets des sciences biologiques, mais les objets de la perception au même titre que tout objet susceptible d'être perçu.

L'architecte André Hermant (1908-1978) développe l'idée de « formes utiles » dans un livre qui assume le caractère *a posteriori* des « ressemblances et parentés » et rapproche ainsi des architectures et des organismes naturels sous le signe du mystère et de l'émerveillement (Hermant, 1959, p. 10). Sous l'exergue de Baudelaire et de l'idée d'analogie universelle, le livre fait l'apologie de l'imagination comme faculté permettant de dépasser les catégories trop rigides de la raison. Ainsi ce livre n'a pas vocation à être une analyse factuelle, ni des processus de conception d'artefacts humains, ni des fonctionnements biologiques des organismes. Cela étant dit, il associe sur une même page les pilastres d'appui de la voûte principale du Salone Agneli du Hall d'exposition de Turin de Pier Luigi Nervi, avec d'anciennes voûtes nervurées à Toulouse et à Châteaudun et des radiolaires de différentes espèces rassemblés sur une illustration (Hermant, 1959, p. 82-83). Plus loin, il associe les ondulations de la voûte du Salone Agneli et ses diaphragmes raidisseurs avec un gros plan sur une feuille de *Victoria regia*, le nénuphar géant (Hermant, 1959, p. 92).

⁵ Cf. le § *Métaphores et images naturelles dans la pensée de Pier Luigi Nervi*, de la partie V. *La piste épistémologique : les connaissances biologiques de Pier Luigi Nervi*.

Dans cette lignée des analogies floues, on trouve d'autres cas. Le biologiste Adolf Seilacher, montre par exemple une coupe de principe d'un projet qualifié de « palais des congrès » de Pier Luigi Nervi qu'il compare à des oursins et à leur morphologie structurale (Seilacher, 1979, p. 192). Il ne précise pas le projet, mais il s'agit vraisemblablement du concours pour la foire internationale de Gênes (1960). La coupe reste cependant très schématique. Bruno Zevi aurait également assimilé le Palazzetto dello sport à une méduse⁶. On peut trouver également le terme « d'architecture moléculaire » (Antinarelli & Tito Colombo, 2011), qualifiant l'architecture de Pier Luigi Nervi sans justification particulière dans un ouvrage dont un des articles est illustré avec des images de nervures de feuilles, d'aile de libellule et d'autres organismes non nommés et sans lien avec le texte (Bellucci, 2011)⁷.

C'est donc un monde flou et extensif d'analogies qui s'ouvre : *Flou* car la référence à un organisme particulier tend à se diluer dans une analogie très générale à la « nature » qui devient une notion aux contours peu déterminés ; *Extensif* car en se plaçant *a posteriori*, on peut toujours percevoir une nouvelle analogie entre un édifice et un organisme et la liste ne fait que s'allonger.

De la biologie à la géométrie et à la statique graphique

Un autre domaine référentiel s'ouvre lorsque Petra Gruber cite le système des lignes isostatiques du Lanificio Gatti, en faisant cette fois encore référence à Paolo Portoghesi (Gruber, 2011, p. 65). Paolo Portoghesi, dans un contexte antérieur à l'idée du biomimétisme, établit une analogie en illustrant une citation du biologiste D'Arcy Thomson sur la structure des os et avec un plan des nervures du Lanificio Gatti (Portoghesi, 1999, p. 159). L'extrait est tiré de l'ouvrage *On Growth and Form* d'abord paru en 1917 dans lequel D'Arcy Thomson (1860-1948), le biologiste et mathématicien initiateur de l'idée de biomathématique, insiste sur l'importance de la physique mécanique des formes des organismes naturels. L'extrait rapporte comment l'ingénieur et professeur Karl Culmann (1821-1881), spécialiste du calcul des structures, observe chez l'anatomiste Georg Hermann von Meyer la dissection d'un os. L'ingénieur préoccupé à ce moment par la conception d'une grue particulièrement puissante perçoit dans la structure de la matière spongieuse, dite aussi trabéculaire, un principe d'optimisation structurale : les structures trabéculaires sont disposées selon les lignes des efforts principaux. Cette observation lui aurait inspiré le principe pour la structure de sa grue (Thompson, 1917–1942/2014, p. 976-977). Il faut noter ici le regard particulier qui est porté sur la nature, celui d'un ingénieur.

Cette anecdote intervient dans le chapitre « On Form and Mechanical Efficiency », à un moment de l'argumentation où D'Arcy Thompson s'appuie sur un ensemble de publications du domaine de la mécanique animale, notamment sur des publications de l'anatomiste Jean-Marc Bourgery et du mathématicien Julius Wolff. Ce dernier est l'auteur des lois dites « de Wolff » concernant la relation entre la formation des os et la direction des contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis. D'Arcy Thompson reproduit notamment des illustrations de Georg Hermann von Meyer (cf. Figure 5, a) et de Julius Wolff (cf. Figure 5, b).

⁶ Zevi, Bruno. *Cronache di architettura*. voll. 2. Dalla celebrazione di Rossetti all'opera di Utzon a Sidney. Bari: Laterza, 1971. Cité par Maria Teresa Cutri <https://archidiap.com/opera/palazzetto-dello-sport/> (consulté le 21/05/2021).

⁷ Une seule légende générale indique « I disegni ad illustrazione del testo mostrano l'evoluzione strutturale della geometria piana nella genesi biologica » sans plus d'explication ni de sources. Elle reste ainsi tout à fait obscure au vu des enjeux scientifiques sous-jacents.

Ce sont des extraits de ces illustrations qui seront ensuite repris à l'identique par Werner Nachtigall, Göran Pohl et Michael Pawlyn. Mais si l'on reprend l'argumentation de D'Arcy Thompson, il faut noter que la relation entre la grue et l'os est inverse: « the anatomical arrangement of the trabeculae follows precisely the mechanical distribution of compressive and tensile stress or, in other words, accords perfectly with the theoretical stress-diagram of the crane » (Thompson, 1917–1942/2014, p. 978). Contrairement au discours du biomimétisme, ce n'est pas l'os qui inspire une innovation technique, mais c'est l'innovation technique qui valide l'efficacité structurelle de l'os. Cet exemple sert sa thèse de la morphologie fonctionnelle.

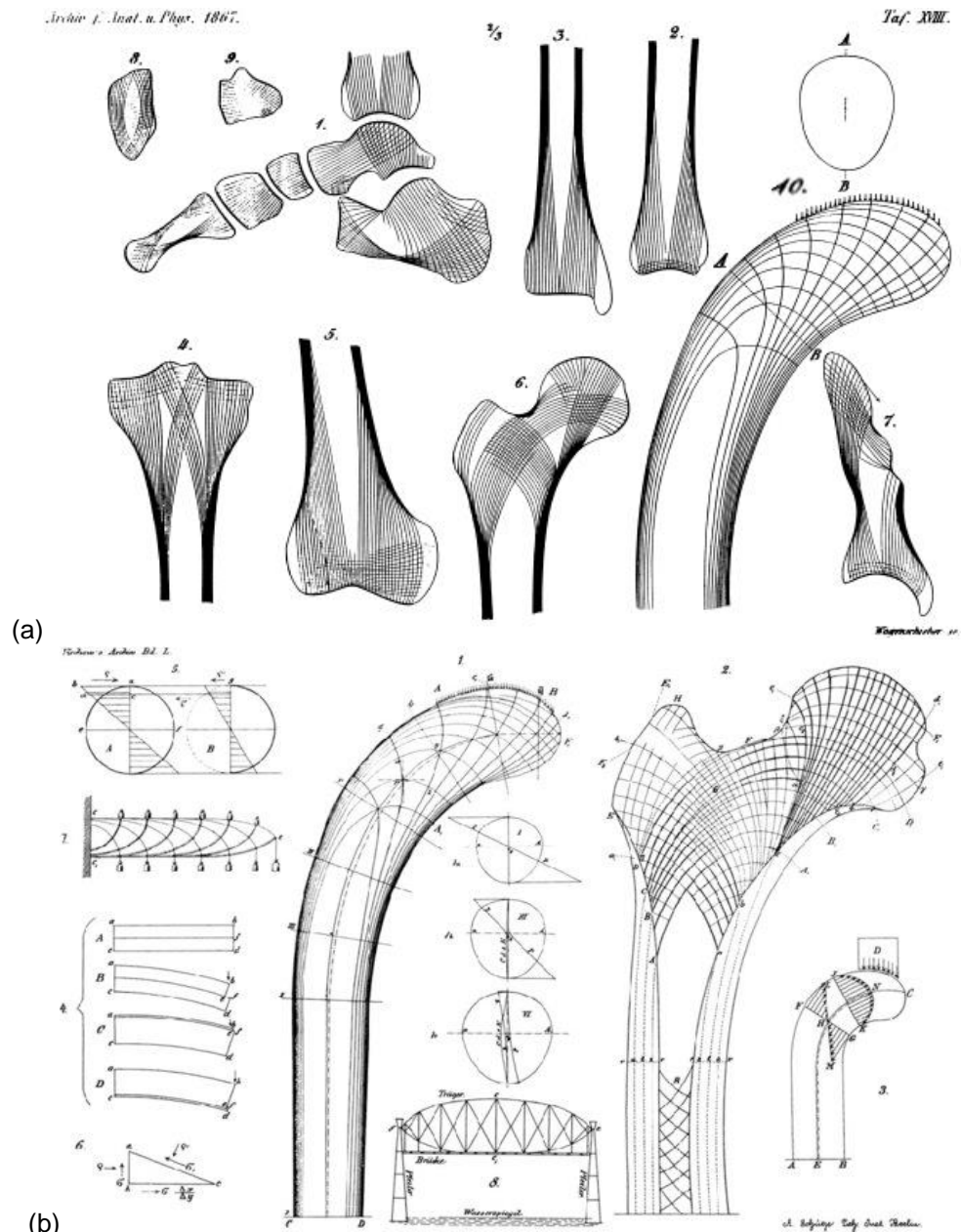


Figure 5 — trajectoires des efforts mécaniques dans des os des structures avec, sur la planche (a) n°10, avant dernier en bas à droite, le diagramme de la grue simplifiée de Karl Culmann (tiré de (a) : von Meyer, 1867; (b) : Wolff, 1870)

Werner Nachtigall et Göran Pohl citent également une publication de Karl Culmann de 1870 (Nachtigall, 2003, p. 146-147; Pohl & Nachtigall, 2015, p. 156)⁸ qui ne figure pas dans leur

⁸ Qu'ils orthographient « Cullmann ».

bibliographie. Ils mentionnent un brevet de Pier Luigi Nervi qui ferait référence à l'observation de l'os par Karl Culmann. Ils tiennent vraisemblablement leurs informations d'un certain Lebedew (voir ci-après).

Dans son ouvrage principal, *La statique graphique*, d'abord paru en 1864, Karl Culmann fait effectivement une mention des os, parmi d'autres formes organiques :

« on peut donc tracer sur tout le corps des systèmes de trajectoires, se coupant toutes sous un angle droit, et donnant les directions suivant lesquelles se transmettent les tensions et les pressions : nous nommerons par suite ces trajectoires courbes des tensions et courbes des pressions. Si l'on suppose condensée en ces courbes toute la matière qui est située entre elles, le nouveau corps n'aura à résister qu'à des efforts de tension ou de compression, et résisterait aux mêmes actions que le corps primitif. Les constructions de la nature présentent partout ces courbes des tensions et des pressions ; nous les trouvons dans les fibres du bois, dans les mailles du tissu spongieux des os. Elles y sont si bien en évidence, qu'on ne peut avoir aucune espèce de doute au sujet de la transmission effective des efforts suivant les directions qu'elles présentent. Nous construirons, plus tard, ces courbes pour diverses poutres. » (Culmann, 1880, p. 492-493).

L'ouvrage de plus cinq cents pages est néanmoins principalement consacré à des méthodes de constructions géométriques passant par l'épure plutôt que les calculs analytiques, et se basant sur la géométrie de position plutôt que l'algèbre pour traiter de questions statiques telles que la décomposition des forces, les forces parallèles, la théorie de l'élasticité. Ces méthodes sont destinées à des applications pour le dimensionnement des structures. Cette mention isolée du tissu organique des os y tient donc une place tout à fait marginale.

On retrouve dans les déclarations concernant les supposées inspirations biologiques de Pier Luigi Nervi ce type de considérations mathématico-géométriques. C'est le cas notamment de la spirale algorithmique étudiée par le biomathématicien D'Arcy Thomson, dont on trouverait également la présence dans le dessin des nervures du Palazetto dello sport (Leslie, 2003).

Il faut noter ici que le discours franchit les limites de la biologie, entendu au sens strict comme science du vivant, et s'établit dans le domaine de la géométrie et la physique mécanique ; des sciences de l'inerte. Des faits similaires ont été observés dans d'autres cas architecturaux plus récents où, de même, l'inspiration d'organismes vivants est médiatisée par d'autres sciences non biologiques (Chayaamor-Heil & Vitalis, 2021).

Du biomimétisme à la bionique

Lorsque Göran Pohl et Werner Nachtigall mentionnent les structures à nervures suivant les trajectoires isostatiques du Lanificio Gatti inspirées de l'étude de la structure des os, ils font référence à l'ouvrage d'un certain Lebedew (Nachtigall, 2003, p. 146-147; Pohl & Nachtigall, 2015, p. 155-156). Le livre de Juri S. Lebedew⁹ (1921-1992), *Architektur und Bionik*, traduction allemande d'un livre d'abord publié en russe en 1977 issu de la thèse de l'auteur de 1968, nous emmène dans un autre domaine de recherche : la bionique. Pier Luigi Nervi est mentionné plusieurs fois dans ce livre, mais seulement dans le chapitre concernant les principes de construction et les lois de la forme, et non dans les deux autres concernant l'écologie et l'esthétique.

⁹ Ou Yuri Lebedev selon les transcriptions.

Pier Luigi Nervi est surtout cité au sujet des membranes et coques minces. Juri S. Lebedew reprend une longue citation de l'ingénieur-architecte italien, tirée d'une intervention à un congrès de l'Union internationale des architectes (UIA) de 1954. Pier Luigi Nervi y indique que devant des constructions de portées de plus en plus grandes, les constructions requièrent des formes qui sont en harmonie avec les lois de la nature. D'après Pier Luigi Nervi dans cette citation, les lois de la nature seraient les facteurs déterminant des formes pour atteindre un degré élevé de rendement, elles sont ainsi à l'origine d'un nouveau style (Lebedew, 1977/1983, p. 107). Juri S. Lebedew cite également le livre *Savoir Construire* de Pier Luigi Nervi et en particulier le principe de « résistance par la forme » qui d'après l'ingénieur-architecte italien se trouverait dans les calices, dans les roseaux ainsi que dans les coquilles d'œuf et les coquilles chitineuses des insectes et dans les coquillages (Lebedew, 1977/1983, p. 107-109). Or le texte complet est le suivant :

« il est bien sûr difficile de donner une définition de ces systèmes particuliers, que je proposerais d'appeler résistants par leur forme, étant donné que la nature et les ouvrages du domaine commun nous en offrent, tous les jours de nombreuses applications. Les calices des fleurs, les feuilles lancéolées, les roseaux, les coquilles d'œuf et d'insectes, les coquillages, les abat-jour, les carrosseries d'automobile, les vases en verre, et même les éléments d'habillement, comme les chapeaux de femme, sont autant d'exemples de résistance par la forme, et il est certainement très important qu'un nouveau moyen de construction nous permette pour la première fois d'étendre ces structures à de grandes et même de très grandes dimensions. » (Nervi, 1955/1997, p. 143-144)

Plus que les seuls organismes vivants, c'est une curieuse classe d'objets qui se dessine ici, ou les fleurs côtoient les chapeaux, ou les coquillages côtoient les abat-jour... en tronquant la citation, Juri S. Lebedew occulte le fait que Pier Luigi Nervi met sur un pied d'égalité des organismes vivants et des artefacts artificiels. De plus, si l'on suit le raisonnement de Pier Luigi Nervi, les modèles naturels rendent difficile l'appréhension des phénomènes statiques du fait de leur petite taille :

« La véritable difficulté [à la mise en œuvre de tels systèmes résistants par la forme] réside dans notre manque d'intuition statique et architecturale correspondant à ces systèmes particuliers, et dans la difficulté qu'il y a à la développer. Les nombreux exemples qui nous entourent sont de trop petites dimensions (feuilles, calices de fleurs, coquilles d'insectes) et ne concernent donc pas le poids de notre corps et la force de nos muscles, ou bien lorsqu'il s'agit d'objets décoratifs, de meubles, ne permettent pas d'éventuelles expériences statiques. » (Nervi, 1955/1997, p. 145)

Une question d'échelle est donc en jeu dans la transposition des organismes naturels à l'architecture. Du point de vue d'une échelle technique, visant la compréhension des efforts statiques, les organismes naturels sont jugés trop petits¹⁰. Là-dessus, Juri S. Lebedew ne s'étend pas non plus.

Le livre *Architektur und Bionik* montre ensuite une photo de chantier et un plan du CNIT, montrant le système structurel finalement suivi pour la réalisation. Pier Luigi Nervi est cité comme auteur (Lebedew, 1977/1983, p. 118-119), pourtant il ne s'agit pas de sa contribution : Pier Luigi Nervi s'est retiré du projet après que sa proposition n'ait pas été suivie et a demandé à ne pas figurer comme auteur du projet. Plus loin, dans une partie sur les structures à barres Juri S. Lebedew montre une autre image du projet du CNIT

¹⁰ Cela semble contredire les remarques précédemment citées de Manfredi Nicolletti et Paolo Portoghesi concernant l'emploi des analogies organiques dans la pédagogie de Pier Luigi Nervi.

représentant cette fois la structure effectivement étudiée par Pier Luigi Nervi et qualifiée de variante. Ici se trouve l'analogie avec un radiolaire dont l'image est empruntée au biologiste et philosophe allemand Ernst Haeckel¹¹ (1834-1919) et sera ensuite reprise telle quelle par Werner Nachtigall (Lebedew, 1977/1983, p. 126-127).

Enfin, Juri S. Lebedew affirme, sans argumentation préalable, l'existence d'une analogie entre une feuille végétale (sans préciser de quelle espèce) et un plafond réalisé par Pier Luigi Nervi (sans préciser lequel). L'analogie serait par elle-même convaincante (Lebedew, 1977/1983, p. 121). Il passe ensuite du thème végétal à celui des os, percevant dans le vocabulaire de la construction — « Rippenstruktur » en allemand et « ribs » en anglais signifient littéralement les côtes du squelette¹² — la justification d'une analogie entre nature et architecture. Il considère que Pier Luigi Nervi applique sciemment et maîtrise des principes, qu'il qualifie de biotechniques. En particulier, il décrit un principe de renforcement transversal des structures selon les lignes de contraintes principales qui serait appliqué à la fois dans les raidisseurs du palais des congrès de Turin et dans les nervures du Lanificio Gatti¹³. Il y a là pour Juri S. Lebedew des analogies évidentes avec la disposition des nervures principales et secondaires des feuilles de *Victoria Regia* et des cosses de pavot (Lebedew, 1977/1983, p. 122-125). Parlant du Palais des congrès de Turin, Juri S. Lebedew s'appuie ici sur un livre de l'architecte hongrois Máté Major. Mais Juri S. Lebedew ne précise pas si Pier Luigi Nervi est conscient d'appliquer seulement un principe structurel ou s'il est conscient que ce principe est également biologique. Il ne dit pas pour qui les analogies sont évidentes.

On est alors justifié à s'interroger sur les sources dont disposait Juri S. Lebedew pour ses affirmations. Le seul ouvrage du biologiste allemand Ernst Haeckel que Juri S. Lebedew cite dans un autre passage est l'ouvrage *Formes artistiques de la nature (Kunstformen der Natur)* dont la première publication date de 1899¹⁴. On n'y trouve pas pourtant l'image de la radiolaire *Callimitra* mise en parallèle avec l'étude du CNIT. Göran Pohl et Werner Nachtigall citent un autre ouvrage datant de 1878, mais ne figurant pas dans leur bibliographie. Après recherches, l'illustration est une vue dorsale de la *Callimitra agnesæ*, figurant sur la planche 63 du *Report on the Radiolaria collected by H.M.S. Challenger during the years 1873-1876*¹⁵.

Le travail d'Ernst Haeckel ramène ainsi à un contexte bien antérieur au travail de Pier Luigi Nervi. La biologie de la fin du XIXème siècle est à un stade d'avancement particulier. À titre d'exemple de cette période, on peut citer le concept de cellule qui est en phase d'acceptation parmi les biologistes. Haeckel qui participe aux débats comme promoteur de la théorie cellulaire, utilise pour ce faire l'image d'une assemblée de citoyens. Cette métaphore est ainsi pétrie d'idéologie. Selon l'analyse de l'historien des sciences, Georges Canguilhem : « une philosophie politique domine une théorie biologique » (Canguilhem, 1992, p. 88). À côté de son travail de biologiste, Ernst Haeckel, poussé par une tentative de relier la biologie à l'art, s'est également attaché à des considérations esthétiques, focalisées sur la multiplicité des formes que présentent les organismes naturels. Le travail de Ernst Haeckel est également l'objet de plusieurs controverses, notamment concernant sa probité scientifique

¹¹ Dont Juri S. Lebedew abrège le prénom par l'initiale « A. ».

¹² L'équivalent « nervures » en français reste dans le champ sémantique du végétal.

¹³ L'analogie avec l'os dont se réclament Werner Nachtigall et Göran Pohl est donc tout à fait indirecte dans le texte de Juri S. Lebedew. Elle n'est que le fait de sa réflexion, plusieurs lignes plus haut, sur les termes du vocabulaire de la construction. Juri S. Lebedew ne mentionne pas les lignes isostatiques visibles sur la section d'os.

¹⁴ Visible ici : <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b525055842> (consulté le 6/08/2021).

¹⁵ Visible ici : https://en.wikisource.org/wiki/Report_on_the_Radiolaria consulté le 6/08/2021.

parce qu'il aurait arrangé la réalité des organismes par ses images pour servir sa théorie de la recapitulation qui, en tant que loi générale, a été infirmée.

Il faut noter pourtant que si Göran Pohl et Werner Nachtigall citent Ernst Haeckel, ils le considèrent comme un moment de l'art nouveau, trop superficiel pour fonder le biomimétisme tel qu'ils l'entendent, car se focalisant trop sur la forme au détriment de la fonction¹⁶. Petra Gruber le considère plus simplement comme une prémisse historique lointaine du biomimétisme.

Le travail de Juri S. Lebedew et de son laboratoire de bionique architecturale en URSS est parallèle à celui de l'architecte allemand Frei Otto, avec qui il collabore lors de publications et d'expositions et qui est souvent cité parmi les précurseurs du biomimétisme. Il dénote néanmoins de l'orientation récente prise par le mouvement biomimétique puisque le Russe se consacre explicitement à une recherche esthétique comme le note Dmitri Koslov (2019).

Il est intéressant de noter que le domaine de la bionique duquel se revendique Juri S. Lebedew est impliqué différemment dans des affirmations concernant le biomimétisme de Pier Luigi Nervi chez d'autres auteurs. Un groupe d'auteurs à la croisée de l'ingénierie des matériaux, de la chimie et du design, cite le brevet déposé par Pier Luigi Nervi dans lequel sont mentionnés les structures trabéculaires des os et les observations de Karl Culmann, comme étant une référence non seulement pour le Lanificio Gatti, mais aussi pour un auvent du bâtiment de l'UNESCO à Paris et des galeries du Palazzo del lavoro de Turin (Salvia et al., 2009, p. 257).

La source de ces informations est un ouvrage de vulgarisation d'un naturaliste, Yves Coineau, et d'une architecte, Biruta Kresling traitant également de la bionique. Il est intentionnellement très illustré pour éviter de lasser le lecteur et fait suite à une exposition au Muséum d'Histoire Naturelle tenue en 1885-86. Cet ouvrage et l'exposition qu'il accompagnait semblent principalement guidés par l'idée de progrès technologique et d'innovation. Ils entendent montrer que « les sciences naturelles [ne sont] pas les laissées-pour-compte de l'évolution technique moderne » (Coineau & Kresling, 1897, p. 7). Le travail de Pier Luigi Nervi y apparaît par trois reprises. Le Palazzo del lavoro de Turin est d'abord cité pour ses piliers à section variable, un principe caractéristique de l'architecture de Pier Luigi Nervi. D'après les auteurs, le pilier central « a été conçu comme un arbre à contrefort avec une section variant de la croix située à la base, à la section cylindrique du sommet » (Coineau & Kresling, 1897, p. 32). Ce projet côtoie sur une même double page, les architectures de Frei Otto et d'Antonio Gaudì. Plus loin, c'est l'auvent du bâtiment de l'UNESCO qui est mentionné :

« La dalle en béton, posée sur trois points d'appui, est renforcée par des nervures. Leur agencement suivant les lignes réelles des forces s'inspire de l'architecture de

¹⁶ « However, [Ernst Haeckel] developed no functional morphology and instead depicted the various forms of nature more in the manner of an art historian and in the order of ornamentation. Haeckel's sensational books, such as *Art Forms in Nature* and *Art Forms of the Ocean*, managed to obtain global influence even in America and are today in their original form sought-after rarities. An example for the application of "natural" art forms and the orientation to ornament is the entrance gate to the 1900 World Exhibition in Paris by René Binet, which is based on a radiolarian skeleton. Architects today have overcome this glorified natural romanticism, which had then been singled out and characterized in the literature » (Pohl & Nachtigall, 2015, p. 28-29). Leur jugement concernant l'architecture de René Binet reste pourtant peu argumenté. Il serait intéressant de mener une étude qui se donne les moyens de s'extraire de préjugés historiques sur une période passée pour analyser les propriétés structurelles et fonctionnelles de cet édifice et du radiolaire qui l'a inspiré. Sa structure tripode n'est d'ailleurs pas sans rappeler l'étude du CNIT de Pier Luigi Nervi si l'on veut bien mettre de côté les détails ornementaux propres à l'époque.

l'os spongieux décrite par K. Culmann et H. Meyer » (Coineau & Kresling, 1897, p. 42).

Après avoir rapporté l'anecdote de Karl Culmann et de sa grue, les auteurs citent également le brevet de Pier Luigi Nervi et les galeries périphériques du Palazzo del lavoro de Turin. Enfin, c'est le projet non réalisé du pont Garibaldi à Rome, attribué à Pier Luigi Nervi, qui est cité comme « rappelant » l'os d'un bassin d'oiseau, donc plutôt au titre d'une intuition d'analogie (Coineau & Kresling, 1897, p. 46). Cette attribution semble toutefois peu probable, un article concernant le concours de l'élargissement du pont Garibaldi, montre le même projet indiquant qu'il est conçu par Carlo Cestelli-Guidi, Bruno Zevi, avec la collaboration de Antonio di Carlo, James Ferris, Domenico Gentiloni Silverj et Myron Goldsmith (Ronchi, 1956)¹⁷. Yves Coineau et Biruta Kresling, n'ont pas toutefois un objectif historique. Ils considèrent que les analogies *a posteriori* peuvent être tout aussi utiles puisque dans une orientation de progrès technique elles permettent d'améliorer un dispositif déjà conçu en s'inspirant de dispositifs naturels similaires.

Que signifie ce passage du « biomimétisme » à la « bionique » ? Les deux termes désignent-ils la même chose ? Il semble qu'en remontant à la bionique, on accède à une forme passée du biomimétisme dont le changement de terme ne signifie pas nécessairement un changement de contenu puisqu'une partie des exemples cités sont les mêmes. Les principes certes similaires changent subtilement de sens en raison d'un contexte différent. Certains auteurs affectent de ne pas marquer de différence. Petra Gruber considère les termes de bionic (allemand), celui de bionics (anglais) et de biomimétique comme synonymes, tout en retraçant brièvement l'histoire de leur apparition successive (Gruber, 2011, p. 14). Werner Nachtigall traduit le titre de son livre « Bau-Bionik » (Nachtigall, 2003) par « Biomimetics for architecture » (Pohl & Nachtigall, 2015). Pourtant l'utilisation du terme « bionics » remonte au médecin et colonel de l'US Air Force, Jack E. Steele, à la fin des années 1950 dont se revendique Yves Coineau et Biruta Kresling. Il désigne un objectif d'innovation principalement technologique et notamment des applications de la robotique et de la médecine. On se situe à une période antérieure à la crise pétrolière de 1973, où les préoccupations écologiques ne sont pas les mêmes. Les différents inventeurs de cette époque, dont Pier Luigi Nervi, sont plutôt préoccupés de progrès. Certes le terme « biomimetics » a déjà été utilisé dans les années 1950 par l'ingénieur Otto Schmidt mais c'était, de manière semblable, pour désigner des innovations technologiques dans le domaine des circuits électriques inspirés de l'étude de systèmes nerveux. Cet ancrage nous éloigne des questions architecturales. Cette bionique des années 1950, à la différence de celle de Juri S. Lebedew, renvoie ainsi à un univers d'applications technologiques et d'innovation n'ayant pas nécessairement de lien avec des questions d'écologie, d'esthétique ou spécifiquement architecturale.

Du Palazzetto au Palazzo

Il faut remarquer que l'association entre le Palazzetto dello sport et la diatomée s'avère problématique : lorsque l'on remonte à la 1^{ère} édition allemande du livre dont Werner Nachtigall est alors le seul auteur, il ne s'agit plus du Palazzetto dello sport (Pohl & Nachtigall, 2015, p. 135), mais du Palazzo dello sport (Nachtigall, 2003, p. 130). Or ce sont deux projets différents, situés dans des quartiers différents de Rome : le Palazzetto, le petit

¹⁷ Les archives de l'agence de Pier Luigi Nervi au Centro Archivi MAXXI n'en gardent pas non plus la trace parmi les projets conservés dans le fond "Attività professionale". Le registre du Centro Studi e Archivio della Comunicazione (CSAC) de Parme ne l'indexe pas non plus.

palais, est situé à Flaminio et construit entre 1956 et 1957 tandis que le Palazzo, le grand palais, nommé aujourd'hui PalaLottomatica est situé à l'EUR¹⁸ et construit entre janvier 1958 et juin 1959. La photo de mauvaise qualité qui n'a pourtant pas changé entre les deux éditions montre, dans un contraste saturé en noir et blanc, une coupole dans laquelle on peut distinguer des nervures radiales indiquant qu'il s'agirait bien du Palazzo dello sport dans les deux éditions. Si cette erreur est sans doute le fait d'une coquille elle reste déroutante pour les recherches ultérieures.

* * *

Il apparaît que la remontée dans les sources du biomimétisme fait apparaître certains changements de sens. Des analogies établies d'abord *a posteriori* c'est-à-dire sans toujours prétendre décrire la réalité des processus de conception, des analogies qui sont parfois vagues et multiples, des analogies qui ne prétendent pas être le fruit d'une étude scientifique, mais plutôt de la liberté de l'imagination... semblent ensuite avoir été peu à peu prises au sérieux, et utilisées pour décrire la conception elle-même. Elles se sont peu à peu cristallisées comme des faits établis.

Pourtant la connaissance du travail de conception de Pier Luigi Nervi est parfois approximative dans ces sources qui s'en servent plutôt comme d'un exemple ponctuel appuyant l'énoncé de principes et soutenant un discours plus général. Les projets cités à l'appui de ces textes ne font pas l'objet d'études de cas approfondies. Ces auteurs ne s'intéressent d'ailleurs pas au processus de la conception architecturale. Si, dans certains discours du biomimétisme, Pier Luigi Nervi paraît s'être sciemment inspiré de la nature, c'est un raccourci qui soutient un propos qui ne concerne pas tant Pier Luigi Nervi lui-même qu'un principe général¹⁹. Dans cette histoire, on remarque d'ailleurs que les analogies varient ; tantôt le Lanificio Gatti est semblable à une feuille de nénuphar géant, tantôt il est semblable à un os ; la feuille de nénuphar géant, pour sa part, est tantôt analogue au Lanificio Gatti, tantôt au Salone Agnelli de Turin, tantôt au Palazzetto dello sport... Loin de permettre de conclure quant à l'existence d'analogie effective dans la conception de Pier Luigi Nervi, ces exemples forment les cas à étudier dans la partie suivante.

Enfin, de références en références, les contextes de recherche varient et accentuent certains aspects. Des continuités s'établissent avec des champs de recherches antérieures où la biologie n'est pas toujours prépondérante. Certains contextes sont particulièrement technicistes comme certaines branches de la bionique qui ne sont pas préoccupées de développement durable. D'autres contextes accentuent des questions esthétiques ou de cognition visuelle. Ces continuités s'opposent à l'idée du biomimétisme compris comme une innovation en rupture avec les travaux passés.

¹⁸ Quartier situé au sud de Rome. Il tire son nom de l'*Esposizione Universale Roma* qui devait avoir lieu en 1942 mais fut annulée en 1939 en raison de la seconde guerre mondiale. Le projet élaboré dans les années 1930 témoigne d'un point de vue urbain et architectural des tendances de l'époque. Inachevé en 1939, le quartier été complété après la guerre.

¹⁹ C'est pourtant la validité de ce principe qui s'expose à être remise en cause, dès lors que la validité historique de l'exemple qui l'a soutient est défailante.

IV. La piste phylogénétique : les lignées de conception des projets

Le travail de reconstitution phylogénétique vise à considérer les projets non plus dans leur isolement individuel, mais au sein d'un processus dont ils ne sont qu'une étape. Le phylum dans lequel chaque projet de Pier Luigi Nervi s'inscrit forme ainsi une lignée de projets dont la succession est la marque d'essais, de tentatives, d'avancées et d'adaptations des concepteurs. L'objectif est de reconstituer ces lignées. Il s'agit d'un concept méthodologique pour approcher objectivement les artefacts techniques en restituant leur déterminisme et les milieux associés qui les conditionnent (Guchet, 2008). Parler de lignée phylogénétique ne signifie donc pas tenir métaphoriquement les édifices pour des êtres ou des organes vivants.

À partir des quelques projets cités ci-avant par les penseurs du biomimétisme, l'étude a identifié d'autres projets qui en sont les précurseurs ou les successeurs. Les affirmations de Pier Luigi Nervi lui-même puis l'exploration des archives permettent de voir comment certains projets, notamment ceux non réalisés, s'inscrivent dans un développement continu. Parmi l'ensemble des projets de Pier Luigi Nervi, un recadrage des projets permet de se focaliser seulement sur les projets pertinents, voire sur certaines de leurs parties.

Il faut remarquer toutefois que la phylogenèse n'est pas l'ontogenèse ; le processus d'évolution d'un système structurel, comme les nervures isostatiques, au fil de plusieurs projets n'informe pas *eo facto* sur le processus de conception de chaque système particulier des projets qui composent la séquence. Il ne faut pas confondre les deux processus. Mais d'une part, la reconstitution de ces processus de conception des projets particuliers est difficile chez Pier Luigi Nervi qui semble avoir peu conservé les documents intermédiaires, esquisses et brouillons, constituants les traces essentielles à l'étude de ces processus²⁰. D'autre part, c'est dans les différences et décalages entre les items de la séquence que peuvent se repérer les signes d'un travail de conception propre à chaque projet et à son contexte.

La lignée des planchers isostatiques a fait ici l'objet d'un travail particulièrement approfondi, à partir de la découverte en archive de dix-huit projets. Il est, comme on le verra, la piste la plus sérieuse d'un biomimétisme non métaphorique dans la conception de Pier Luigi Nervi.

Les dalles à nervures isostatiques

La construction du Lanificio Gatti souvent cité dans les textes concernant le biomimétisme débute en 1951 et, d'après les documents conservés aux archives, Pier Luigi Nervi y travaille de 1951 à 1953. Plus que le projet dans son ensemble c'est la dalle à nervures suivant les lignes isostatiques des moments principaux²¹ qui est l'objet d'un possible biomimétisme. Pier Luigi Nervi dit avoir collaboré avec Aldo Arcangeli, ingénieur de son agence, pour la mise au point de ce système (Nervi, 1955/1997, p. 147). Portées par une trame de poteaux de 5 x 5 m, les dalles et leurs nervures porteuses sont en béton armé. Elles sont coulées d'une pièce dans des moules en ferrociment (*ferrocemento*), un matériau mis au point par Pier Luigi Nervi. Le ferrociment est une sorte de béton armé modifié. Inversant les proportions de

²⁰ « non so cosa ritroverò di schizzi e di primi disegni perchè spesso li butto via », Lettre de Pier Luigi Nervi du 13/10/1958 au Prof P. M. Bardi du Museo de Arte Sao Paulo, Brasile, Centro Archivi MAXXI, R7/2.

²¹ Par la suite l'expression sera abrégé en « nervures isostatiques » moins correcte mais plus courte.

métal et de ciment, il contient plus de métal que de ciment. Mais il est mis en œuvre avec une épaisseur beaucoup moins importante. Les fines plaques de 1.5 cm à 4 cm contiennent un dense réseau de mailles de fils de fer, du grillage, positionné dans plusieurs orientations. Le mortier de ciment n'est pas coulé, mais pressé dans les mailles ce qui dispense des coffrages en bois aux géométries limitées et permet ainsi une grande variété de formes. Au Lanificio Gatti les formes des dalles se répètent ce qui permet de réutiliser les moules en ferrociment. Il sont alors fixés sur des échafaudages mobiles ce qui permet une économie et une efficacité de mise en œuvre (Nervi, 1965a, p. 31-32).

Si le matériau de construction est une des caractéristiques spécifiques de ce projet, l'autre réside dans la conception structurelle. Le dessin des lignes isostatiques permet de répartir la matière là où elle est le plus utile. C'est une optimisation. Les nervures suivent deux familles de courbes se coupant à angle droit qui sont les trajectoires des tensions principales dans un corps considéré en deux dimensions. Si l'on substitue à un corps plein, un corps à structure fibreuse orientée suivant ces lignes isostatiques, on obtient un comportement similaire pour un gain de matière considérable (Iori, 2012). Ce dessin répond également à une question esthétique. Pier Luigi Nervi pour qui la qualité technique d'une structure est une condition de la beauté de l'objet, trouve beau le dessin formé par ces lignes. Selon lui, elles confèrent à l'édifice une expressivité esthétique considérable (Nervi, 1965a, p. 32). Mais c'est aussi parce que ces lignes, en suivant une optimisation structurelle, retirent une liberté de choix suppriment les ornements inutiles que Pier Luigi Nervi abhorre. Il dira de ces nervures isostatiques qu'elles ont l'intérêt d'adhérer strictement aux lois de la statique (Nervi, 1965c, p. 97). Le ferrociment permet de se libérer des coffrages en bois aux formes de parallélépipèdes que Pier Luigi Nervi trouvait limitative. La liberté gagnée par la plasticité du béton restait, pour lui, contrainte par le bois. Mais cette liberté conquise n'implique pas d'en faire un usage débridé. Les possibilités formelles étant multipliées, les lignes isostatiques résolvent le problème de savoir quelle forme utiliser.

La dalle à nervures isostatiques du Lanificio Gatti est d'abord un item qui s'inscrit dans une lignée, à la suite de projets précurseurs :

— Le premier item de la séquence semble être le projet pour la manufacture de tabac à Bologne dont le concours date de 1948 et que Pier Luigi Nervi considère lui-même comme un antécédent au Lanificio Gatti (Nervi, 1965a). C'est d'autant plus le cas qu'il avait imaginé une variante avec des nervures isostatiques sur une trame de poutres périphériques de 8 x 5,8 mètres (cf. Figure 6). Non réalisée, il n'en parle pas dans ses publications. C'est finalement une structure plus simple, à nervures plus orthogonales, qui est réalisée.

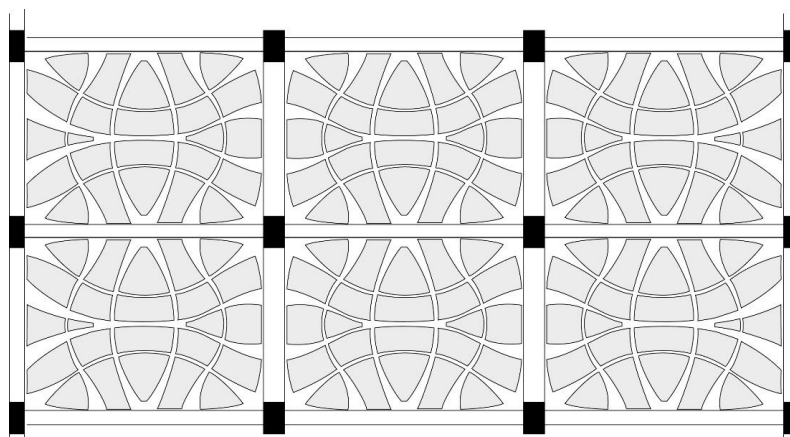


Figure 6 — Variante avec nervures isostatiques pour les planchers de la manufacture de tabac de Bologne, proposition non réalisée (dessin L. Vitalis d'après Nervi & Bartoli, dessin 2948-11 du 11/7/1949 « variante – solai a nervature isostatiche », Centro Archivi MAXXI, P12)

— Il faut ensuite considérer le brevet n°455678, déposé le 23 juillet 1949, accordé le 9 mars 1950 et intitulé « Perfezionamento nella costruzione di solai, volte, cupole, travi-parete e strutture portanti in genere a due o a tre dimensioni, con disposizione delle nervature resistenti lungo le linee isostatiche dei momenti o degli sforzi normali ». Il ne s'agit donc pas tout à fait d'un projet, mais plutôt d'un proto-projet : un système a-contextuel pouvant être concrétisé dans de multiples situations et dont certaines seulement sont imaginées et dessinées. Ce brevet déposé par la société Nervi & Bartoli Anonima per Costruzioni, indique que l'ingénieur Aldo Arcangeli en est l'inventeur.

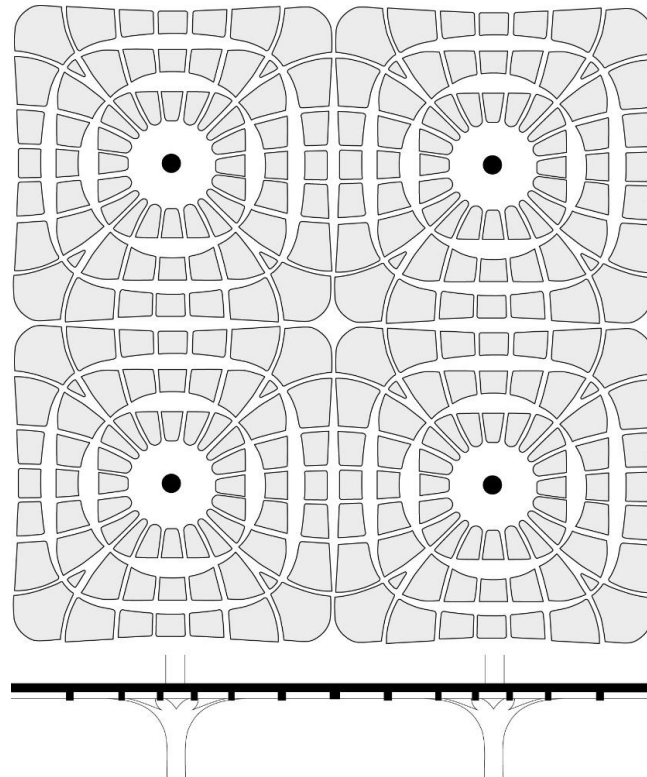


Figure 7 — Plan et coupe des dalles champignons à nervures suivant les lignes isostatiques du brevet n°455678 (dessin L. Vitalis d'après Nervi & Bartoli, brevetto n°455678, Archivio centrale dello stato fig.1 et 2)

Le texte du brevet est principalement constitué d'un raisonnement de physique statique sur la trajectoire des forces auxquelles un corps est soumis²². Suivent des cas possibles d'application multiples, avec différents types d'appuis sur poteaux, avec ou sans poutres, sur des surfaces planes ou courbes... Enfin, le brevet est illustré avec deux exemples d'application ; l'un est le premier exemple de dalle champignon dans la lignée (cf. Figure 7) l'autre est une voûte cylindrique. Les représentations sont sans échelles, mais d'après la taille des caissons on peut supposer une portée d'environ 7 mètres entre poteaux pour les dalles champignons.

On trouve en effet dans ce brevet une citation de l'os trabéculaire ou spongieux observé par Karl Culmann : « Esempi tale genere si trovano numerosi in natura, e classico tra esso è

²² Le fait que ce brevet soit particulièrement centré sur des problèmes physiques semble être un cas particulier si on le compare aux brevets n°465636 (« Procedimento di costruzione per la realizzazione di superfici resistenti piane o curve costituite da reticolati di nervature in cemento armato, completate o meno da solette dicollegamento tra le nervature » déposé le 19/05/1950) ou au brevet n°455750 (« Perfezionamento nella costruzione di solette, lastre ed altre strutture cementizie armate », déposé le 23 juillet 1949) qui sont plus pragmatiques et centrés sur des techniques constructives et de mise en œuvre. On pourrait être tenté d'y voir l'emprunte d'Aldo Arcangeli et de sa passion pour la mécanique statique.

quello delle trabecole ossee, osservato per primo dal Culmann. » (brevetto n°455678, Archivio centrale dello stato, p.2). Mais la mention s'arrête à cette phrase et l'on ne sait pas en quoi l'os, ou un des multiples cas que l'on trouve dans la nature, a servi effectivement d'inspiration dans cette invention.

Certains chercheurs ont fait l'hypothèse que des motifs typiques de la culture indienne observés par Aldo Arcangeli aurait joué un rôle dans l'invention des lignes isostatiques (Gargiani & Bologna, 2016, p. 220). Aldo Arcangeli est en effet resté captif à YOL, dans le district de Kangra en Inde de 1941 à 1946. Pour se maintenir actif pendant cette captivité il consacre son temps à l'étude de la statique, donne des cours à ses codétenus et traduit des ouvrages tel le *Statik und Dynamik der Schalen* de Wilhelm Flügge (Springer, 1934) que lui envoie son père Attilio Arcangeli également ingénieur. Les auteurs s'appuient en particulier sur un dessin d'Aldo Arcangeli, qu'ils estiment être la transcription de cette expérience culturelle et le signe d'une liberté d'invention conquise par l'ingénieur (cf. Figure 8).

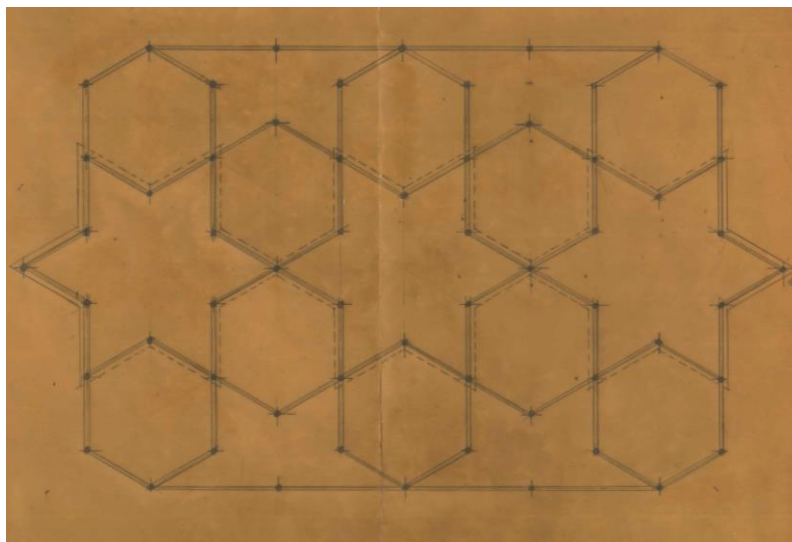


Figure 8 — Étude de l'ingénieur Aldo Arcangeli pour une structure (Archives Aldo Arcangeli, dossier *Progetti varii studiati in India*, Rome)

Il y a cependant deux manières de comprendre cet argument de Roberto Gargiani et Alberto Bologna. Le premier, est de faire l'hypothèse forte que la structure dessinée par Aldo Arcangeli est un item intermédiaire dans la séquence qui mène à l'invention des nervures isostatiques. Or, pour pouvoir donner du crédit cette hypothèse qui fait directement remonter la lignée des nervures isostatiques à des motifs indiens, il faut que ce dessin puisse être dans une double relation avec l'art indien d'une part et avec le dessin des trajectoires isostatiques, d'autre part. Pourtant ce dessin ne comporte ni légende, ni date. Ainsi, le fait qu'il soit issu d'une inspiration indienne reste donc largement incertain²³. De plus, d'un point de vue mécanique, il ne semble pas que les lignes en étoiles offrent une parenté avec les lignes isostatiques ou avec des questions mécaniques. À la différence des lignes isostatiques qui se coupent toujours à angles droit, le motif d'hexagones et d'étoiles à six

²³ Ce dessin est une feuille volante dans un dossier qui ne contient pas d'autre document concernant le même projet. Il pourrait donc aussi bien avoir quelque rapport avec le projet de centre culturel à Tripoli auquel participe Aldo Arcangeli pour lequel une recherche de double-peau brise soleil avait été entreprise et dont les dessins font référence à « sharia sidi hamuda » (Archives Aldo Arcangeli, Rome). On trouve également dans le texte d'accompagnement la mention : « the clear plate glass has a framework of anodized aluminum in ornamental divisions inspired by the themes of traditional Islamic art. » (Architectural and technical report, in Centro Archivi MAXXI, P205, p. 4). Certains dessins de façade font ainsi ressortir des motifs qui pourraient être rapprochés de ce dessin (cf. Centro Archivi MAXXI, F6722 et F6724, in Album 12)

branches impose des angles de 120° et 60° . Les lignes continues sont également interrompues par les branches des étoiles ce qui ne semble pas structurellement pertinent.

Pourtant ce n'est pas exactement ce que disent Roberto Gargiani et Alberto Bologna. Si l'on s'en tient donc à une version faible de l'hypothèse, plus proche du texte des auteurs, le dessin n'est que le signe d'une liberté d'invention. C'est cette liberté d'invention qui est à l'origine des nervures isostatiques et cette liberté d'invention est conquise grâce à l'expérience culturelle indienne. La structure dessinée par Aldo Arcangeli est alors dans un rapport indirect à l'invention des nervures isostatiques. Dans cette version l'argument n'est pas réfutable tant qu'il ne définit pas plus précisément la liberté d'invention en question. Et si les doutes soulevés à l'instant quant à l'origine du dessin, de ce qu'il représente et de l'intérêt structurel de la structure représentée, continuent de peser, l'argument peut être soutenu malgré eux.

— Il faut noter le projet pour la piscine de l'Académie Naval de Livourne de 1949, pour lequel Pier Luigi Nervi avait proposé une variante avec des nervures isostatiques finalement non réalisée (Gargiani & Bologna, 2016, p. 225). Ces nervures rigidifiaient cette fois une voûte parabolique. Mais c'est une autre ligne de projet qui s'ouvre ici, celle des lignes isostatiques sur plan courbe et continue la ligne des voûtes cylindriques ouverte par le brevet n°455678

— À la même période où s'élabore le Lanificio Gatti, l'agence de Pier Luigi Nervi conçoit une manufacture de tabac à Rome (1951). Un dessin de nervures isostatiques d'un nouveau type est ici proposé sur le principe des poteaux champignons. Elles se développent cette fois sur une trame à symétrie axiale qui sur la base d'une portée transversale de 4 m fait alterner deux travées de 7,5 m autour d'une travée de 3,5 mètres (cf. Figure 9).

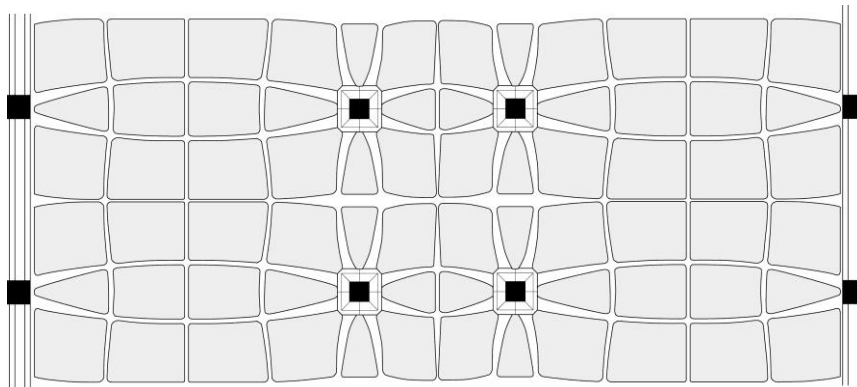


Figure 9 — Étude d'un plancher à nervures isostatiques pour la manufacture de tabac de Rome (dessin L.Vitalis d'après Nervi & Bartoli, Centro Archivi MAXXI, F11303)

— C'est seulement à ce point de la réflexion sur les nervures isostatiques qu'intervient la conception du Lanificio Gatti. Des dalles à nervures isostatiques sont alors mises au point sur une trame de poteaux de 5 x 5m pour le sous-sol semi-enterré. C'est un système de dalles champignon très proche du brevet qui est ainsi développé avec un nombre moins important de nervures pour s'adapter à la taille plus réduite et éviter des caissons trop petits (cf. Figure 3, p. 7). Dans sa lignée, ce travail précède également d'autres projets :

— Pour le projet non réalisé de la gare de Naples (1954) conçu avec Campanella Mario et Vaccaro Giuseppe, Pier Luigi Nervi continue son travail en changeant d'ordre de grandeur. La couverture d'environ 13 mètres de hauteur totale repose sur une double rangée de poteaux « champignons » portant chacun une couverture d'environ de 35 x 30 mètres. La continuité des nervures horizontales dans les nervures verticales des poteaux est ici fortement marquée. Les nervures sont disposées selon une fausse symétrie qui tient compte de la zone au centre de la rangée de poteaux, moins sollicitée que les porte-à-faux.

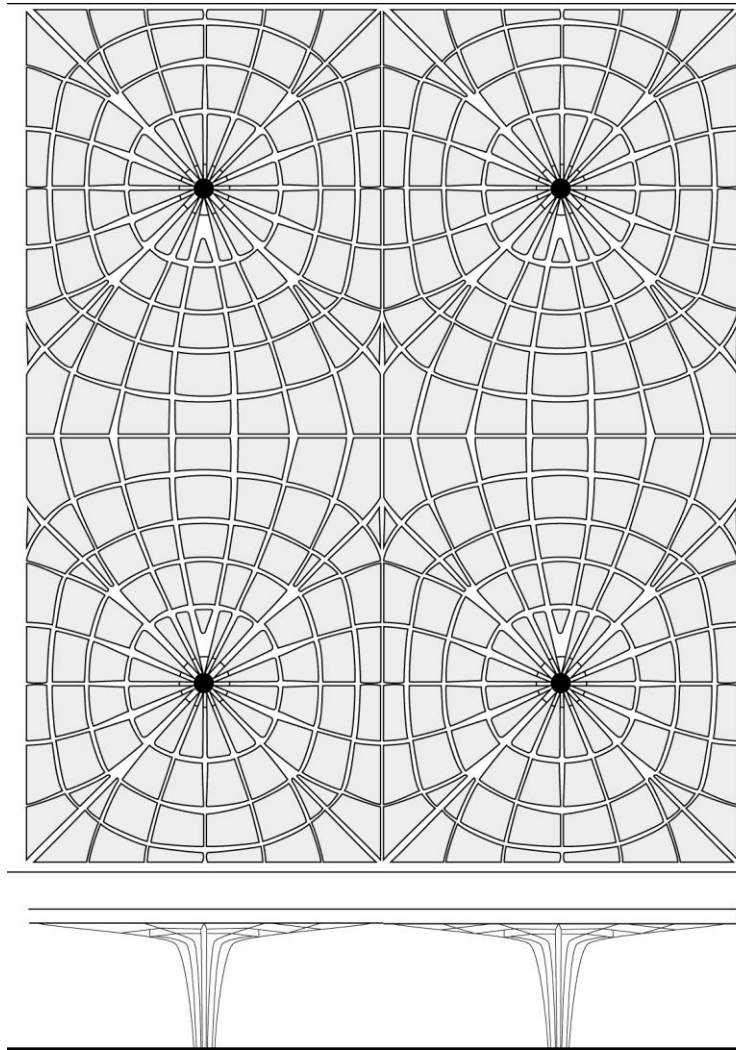


Figure 10 — Plan de la couverture et profil schématique d'une étude pour la garde de Naples par le Studio Nervi (dessin L. Vitalis, d'après Gargiani & Bologna, 2016, p.296).

— Les nervures isostatiques vont être reprises dans le projet du bâtiment de l'UNESCO à Paris (1951-1958), conçu par Pier Luigi Nervi avec les architectes Marcel Breuer et Bernard Henri Zehrfuss. Une des études préalables envisage d'abord de reprendre le système de nervure du Lanificio Gatti. Cette intention est clairement visible par une perspective intégrant un collage d'une photo du Lanificio Gatti. Finalement le système structural sera seulement utilisé pour l'avant-toit de l'entrée « Fontenoy » de l'UNESCO à Paris (Iori, 2012, p. 760). C'est une version originale du dispositif dont le dessin particulier découle de la configuration sur un plan trapézoïdal à trois appuis portant environ 13 x 12 mètres.

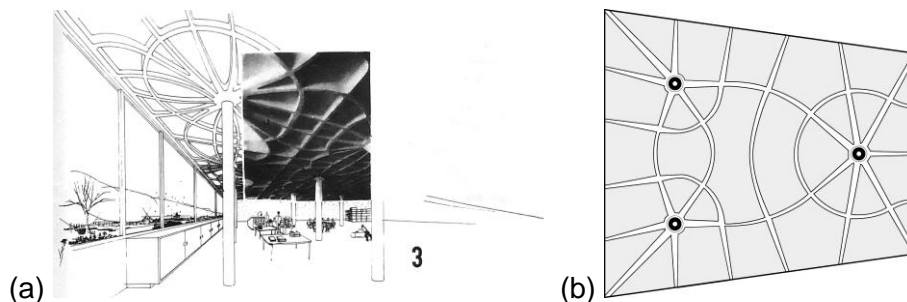


Figure 11 — Projet de la maison de l'UNESCO à Paris par Nervi, Breuer & Zehrfuss : (a) perspective de la salle de publication, non réalisé (Centro Archivi MAXXI, P25, Avant-projet, p.VIIIId) ; (b) auvent réalisé pour l'entrée Fontenoy (dessin L. Vitalis, d'après, Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 4-G).

— L'église dédiée au Cœur Immaculé de Marie à Borgo Panigale, dans la périphérie de Bologne conçue avec l'architecte Giuseppe Vaccaro (1955) décline les lignes isostatiques pour la première fois sur un plan circulaire portées par quatre poteaux espacés d'environ 14 mètres (Nervi, 1957).

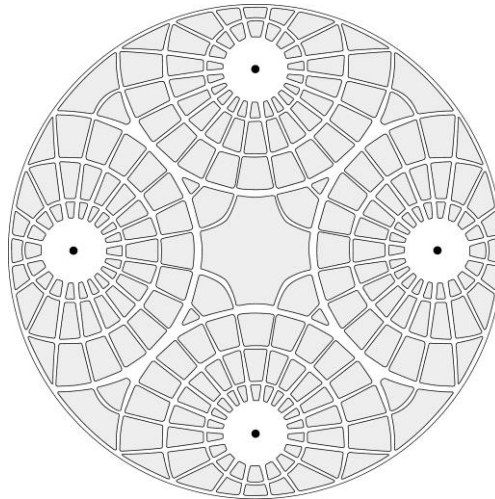


Figure 12 — Structure du plafond de l'église de Borgo Panigale de Nervi & Vaccaro (dessin L. Vitalis, d'après Nervi, 1957, p.34)

— Le projet non réalisé pour l'édifice du groupe La Rinascente à Rome avec les architectes Ignazo Gardella et Luigi Piccinato (1957-1964), reprend la typologie des nervures portant sur des poutres de rive de la variante non réalisée de la manufacture de tabac de Bologne et la développe sur une portée beaucoup plus grande de 26 x 20,5 mètres. Ce projet présente un nombre de caissons différents particulièrement élevé : les trente-huit formes différentes ne sont répétées que quatre fois sur un plan ce qui peut paraître peu économique. Mais il faut considérer que la dalle devait se répéter sur plusieurs étages.

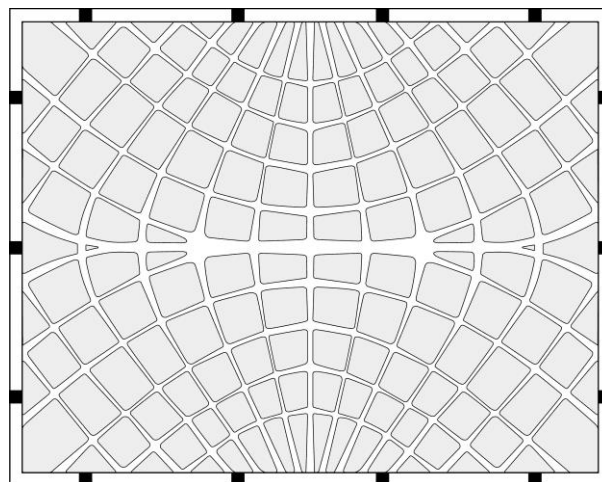


Figure 13 — Dalle à nervures isostatiques pour le projet de La Rinascente à Rome de Pier Luigi Nervi, Gardella & Piccinato (dessin L. Vitalis d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, P31, 32534)

— Pier Luigi Nervi remporte, avec son fils Antonio, le concours du hall d'exposition, le Palazzo del Lavoro à Turin, pour l'évènement « Italia 61 » en 1959. L'édifice réalisé connaîtra une renommée internationale. Le projet comprend des mezzanines périphériques qui sont un développement des nervures isostatiques du Lanificio Gatti. La trame de poteaux de 12 x 12 mètres est complétée par des porte-à-faux de 4 mètres pour former une galerie de 20 m de large. La partie centrale est formée de nervures courbes semblables à celles déjà élaborées pour le Lanificio Gatti avec quelques nervures de moins, tandis que les porte-

à-faux font apparaître des nervures droites et effilées qui vont contrebalancer les efforts centraux. En laissant libre un quart de la dalle, le système laisse le passage aux piliers monumentaux en croix et permet le passage des escaliers.

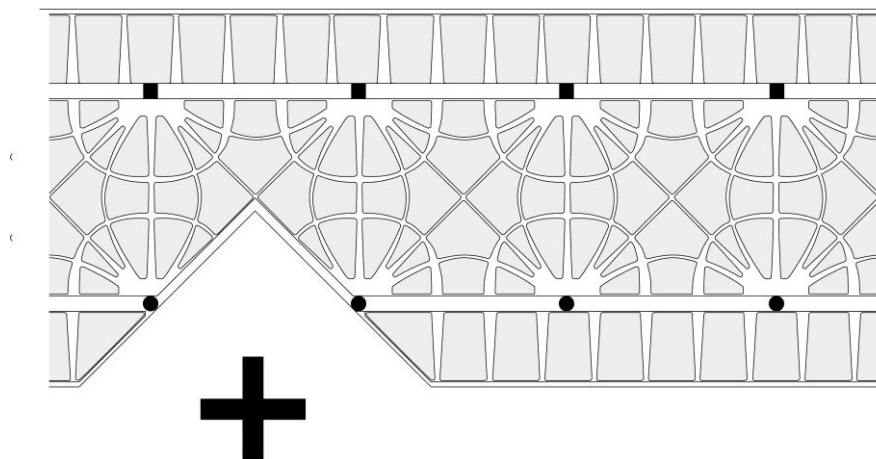


Figure 14 — Dalles à nervures isostatiques du Palazzo del Lavoro à Turin de P.L. Nervi & A. Nervi (dessin L. Vitalis d'après Nervi, 1965a, p.81)

— Dans le projet du Palazzo dello sport, conçu avec l'architecte Marcello Piacentini et construit entre janvier 1958 et juin 1959, les galeries périphériques reprennent la typologie de nervures isostatiques reposant sur des poutres de rive d'une portée d'environ 11 x 6 mètres. Pour la première fois le système est formé de trapèzes à un seul axe de symétrie pour permettre de décomposer le plan circulaire de la galerie en portions identiques.

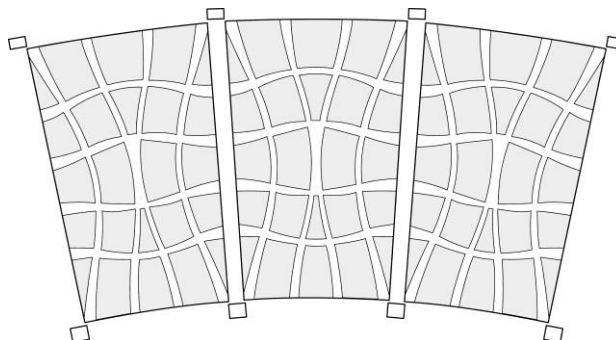


Figure 15 — Dalles à nervures isostatiques du Palazzo dello sport à Rome de Nervi & Piacentini (dessin L. Vitalis, d'après Pier Luigi Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 19, B200)

— Pour le projet d'église du quartier de l'ANIC (Azienda Nazionale Idrogenazione Combustibili) à Ravenne (1962-1963) un système pour les panneaux de façade verticaux, avec des nervures isostatiques au niveau des vitraux aurait été imaginé, selon Roberto Gargiani et Alberto Bologna. Ils montrent à l'appui un dessin d'Aldo Arcangeli (Gargiani & Bologna, 2016, p. 365-367). Ce cas ouvrirait alors une typologie de nervures sur plan horizontal. Pourtant rien ne confirme dans les archives de son agence au MAXXI que le travail de conception de ce dessin non légendé est bien en rapport avec ce projet d'église. L'article de Pier Luigi Nervi (Nervi, 1965b) qui reprend le texte « *Chiesa di Ravenna : relazione architettonica* » indique surtout que les vitraux ont été travaillés en vue du « *maggiore effetto decorativo e mistico possibile* » (Centro Archivi MAXXI, P79/1). Les différentes recherches de tracé pour les structures des vitraux ne montrent ni ne mentionnent de variante à nervures isostatiques (voir les dessins 25933, 25952, 25951 et 25982, Centro Archivi MAXXI, in P79/2).

— Avec le projet de mémorial à Enrico Fermi, à Chicago, Pier Luigi Nervi revient sur une version de grande dimension des nervures isostatiques, initiée lors de la gare de Naples.

Mais le projet dont la commande date de 1963 est finalement arrêté en 1966 pour des raisons économiques (Bologna, 2013, p. 115). Les quatre poteaux massifs définissent un carré de 35 x 35 mètres de portée auquel s'ajoutent 7,5 mètres de porte-à-faux périphériques sur le mode déjà réalisé pour le Palazzo del Lavoro.

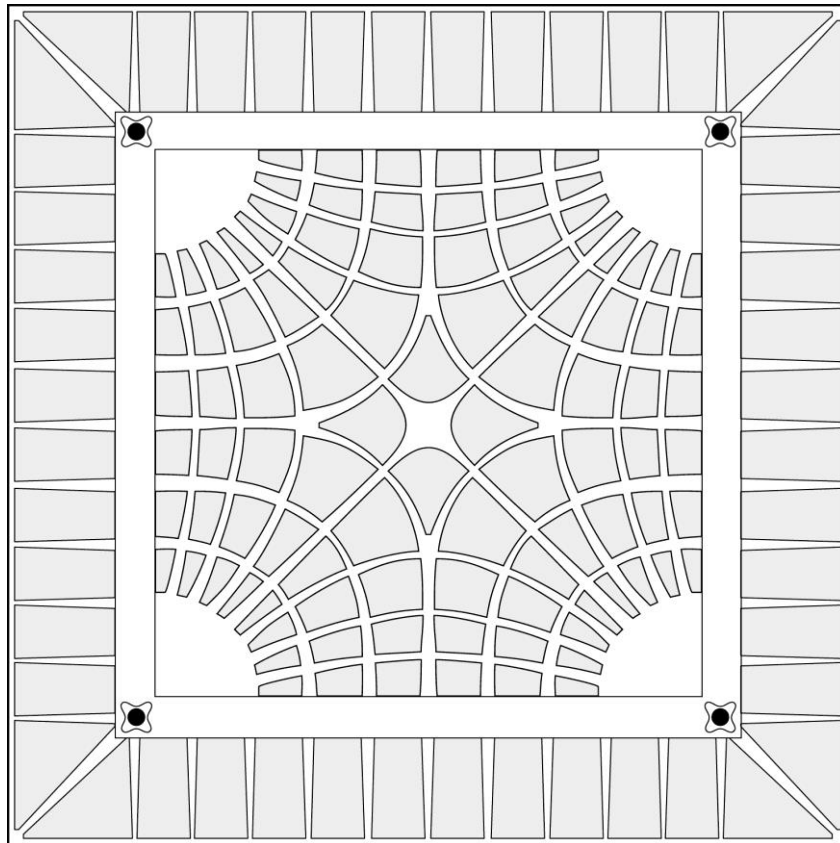


Figure 16 — Couverture à nervures isostatiques du mémorial à Enrico Fermi à Chicago de Pier Luigi Nervi (dessin L. Vitalis d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, F05533)

— Ce type de plan carré sera finalement réalisé pour la 1^{ère} fois à la Casa di risparmio de Venise (1963-1975), conçue avec l'architecte Angelo Scattolin. Le dispositif structurel qui couvre le hall principal du rez-de-chaussée passe cependant à une portée de 19,70 x 19,70 mètres entre poteaux. On peut noter que le nombre de nervures isostatiques est également réduit par rapport au mémorial Fermi, très vraisemblablement pour ne pas descendre en dessous d'une épaisseur minimale de nervure.

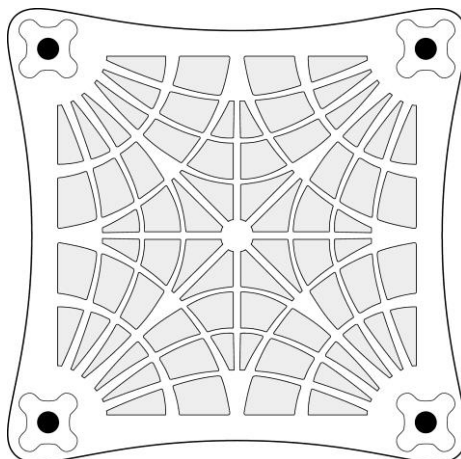


Figure 17 — Dalle à nervures isostatiques du hall de la Casa di Risparmio de Venise de Nervi & Scattolin (dessin L.Vitalis, d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, 27422)

— Pour le projet, non réalisé, d'extension de la cathédrale de Portsmouth au Royaume-Uni, étudié avec le bureau d'architecture Seely & Paget (1964-1968), différentes solutions sont étudiées pour couvrir la nef périphérique et le déambulatoire. Deux de ces solutions mobilisent un système de nervures isostatiques qui reprennent au Palazzo dello sport le principe de décomposition du plan circulaire en portions trapézoïdales qui font ici environ 4 à 5 mètres à l'entraxe.

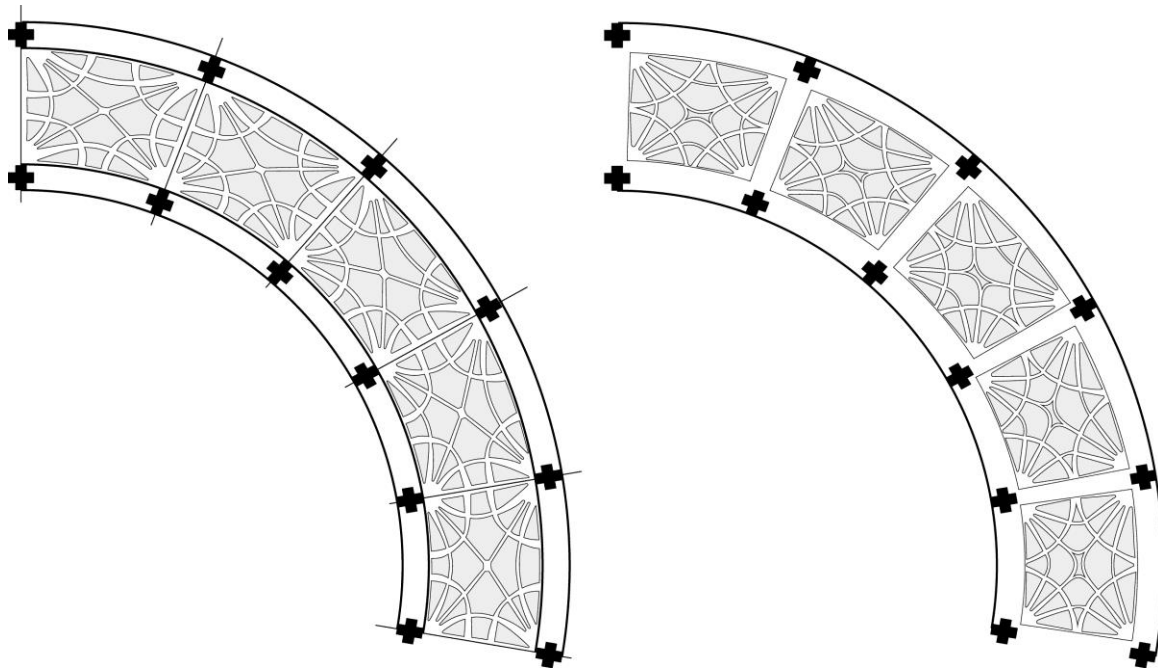


Figure 18 —Variantes de dalles à nervures isostatiques pour le déambulatoire de la cathédrale de Portsmouth de Nervi, Seely & Paget (dessin L.Vitalis, d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 8, F7833 et F7836)

— Le système de nervures isostatiques va être mobilisé de plusieurs manières pour la salle d'audience pontificale commandée à Pier Luigi Nervi en 1964, puis inaugurée en 1971. Il concerne trois espaces : le trône papal qui est couvert par une grande dalle isostatique de 15 x 21 m. de portée ; l'atrium séparant la grande salle de l'entrée mobilise une série de petites dalles trapézoïdale d'environ 6 x 7 mètres sur plan courbe ; enfin, le salon pontifical est couvert par un plafond de 11 x 11 mètres. Les rosaces de 6 x 18 mètres des parois latérales de la grande salle développent également la lignée des nervures isostatiques sur plan horizontal.

Ici le dessin des nervures atteint une grande liberté, dont l'expressivité a un caractère particulièrement décoratif. On voit apparaître un vide circulaire ou elliptique central qui est généralisé aux différentes dalles à nervures isostatiques du projet. S'il libère un espace central permettant l'installation d'éclairages zénithaux particulièrement suggestifs, on peut douter du rôle statique des nervures qui les encadrent étant donné qu'elles échappent à la règle des croisements à angle droit. Mario Desideri, un des ingénieurs ayant collaboré avec Pier Luigi Nervi de 1949 à 1972, et notamment sur les nervures isostatiques, s'exprime ainsi au sujet de la couverture du trône : « il solaio sul trono papale è realizzato con nervature curvilinee, *sic et simpliciter* » (Desideri, 2011, p. 137). Cette affirmation semble jeter un doute quant au caractère réellement isostatique des lignes suivies par ces nervures. On peut penser que pour ce projet particulièrement symbolique et fastueux, Pier Luigi Nervi, arrivé à une maîtrise des systèmes isostatiques et sa renommée internationale établie, aurait cédé une part plus importante à l'esthétique pour ces parties secondaires du projet (c'est la grande salle voûtée qui concentre les efforts et réalise la performance statique majeure).

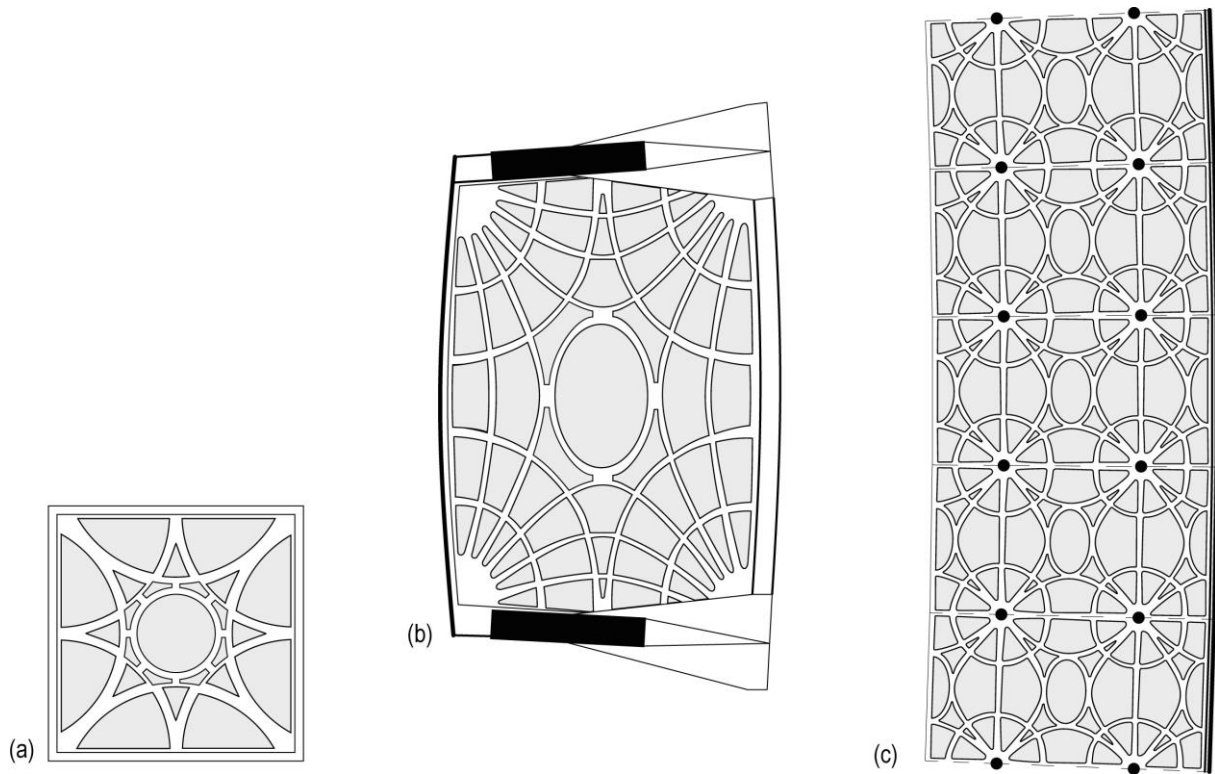


Figure 19 — Dalles à nervures isostatiques couvrant (a) le salon pontifical, (b) le trône papal et (c) l'atrium de la salle d'audience pontificale à Rome de Pier Luigi Nervi (dessin L.Vitalis, d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 11, F6895)

— Le projet non réalisé pour le centre culturel de Tripoli en Libie (1966-1968) comprend deux déclinaisons des nervures isostatiques. Celles du hall d'entrée principal se développent pour la première fois sur la base sur un plan elliptique de 22 x 14 mètres. Le plan ne suit qu'une symétrie axiale en raison du placement des poteaux qui sont plus écartés sur l'un des grand côtés sans doute pour favoriser l'accès au foyer en haut des escaliers. Les nervures de la salle d'exposition reprennent la lignée des plans carrés, ici de 17 mètres de côté, tout en introduisant de nouveaux raffinements notamment le long des diagonales et des médiatrices ou les nervures se subdivisent avant de re-converger vers le centre ce qui impose des angles de croisement qui ne suivent pas la règle des 90°.

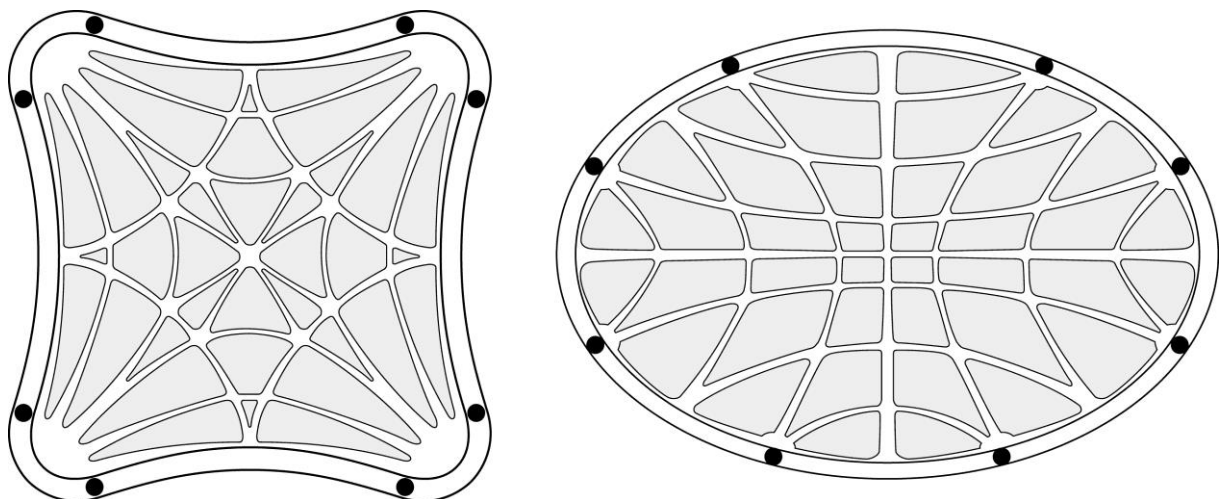


Figure 20 — Dalles à nervures isostatiques de la salle d'exposition (gauche) et du hall d'entrée (droite) du centre culturel de Tripoli de Pier Luigi Nervi (dessin L.Vitalis, d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 12, F6714)

— Pour le projet non réalisé de l'édifice abritant le musée Pitt Rivers et le centre d'études anthropologiques à Oxford en Grande-Bretagne conçu avec Powell and Moya Architects (1965-1968), Pier Luigi Nervi généralise à l'ensemble du plan circulaire le principe de décomposition en dalles à nervures isostatiques trapézoïdales. Les dalles champignons reprennent ici presque exactement celles du Lanificio Gatti avec seulement une adaptation au plan trapézoïdal poursuivant ainsi la lignée des plans courbes. Les dalles sont également ajourées à la manière du Palazzo del lavoro pour laisser des trémies pour des escaliers ou des doubles hauteurs. Elles ont une portée de 9 x 7 mètres à 9 x 11 mètres selon l'emplacement dans le plan. La description de ce projet ne qualifie pas ces structures d'« isostatiques », mais parle seulement du « système nervi »²⁴.

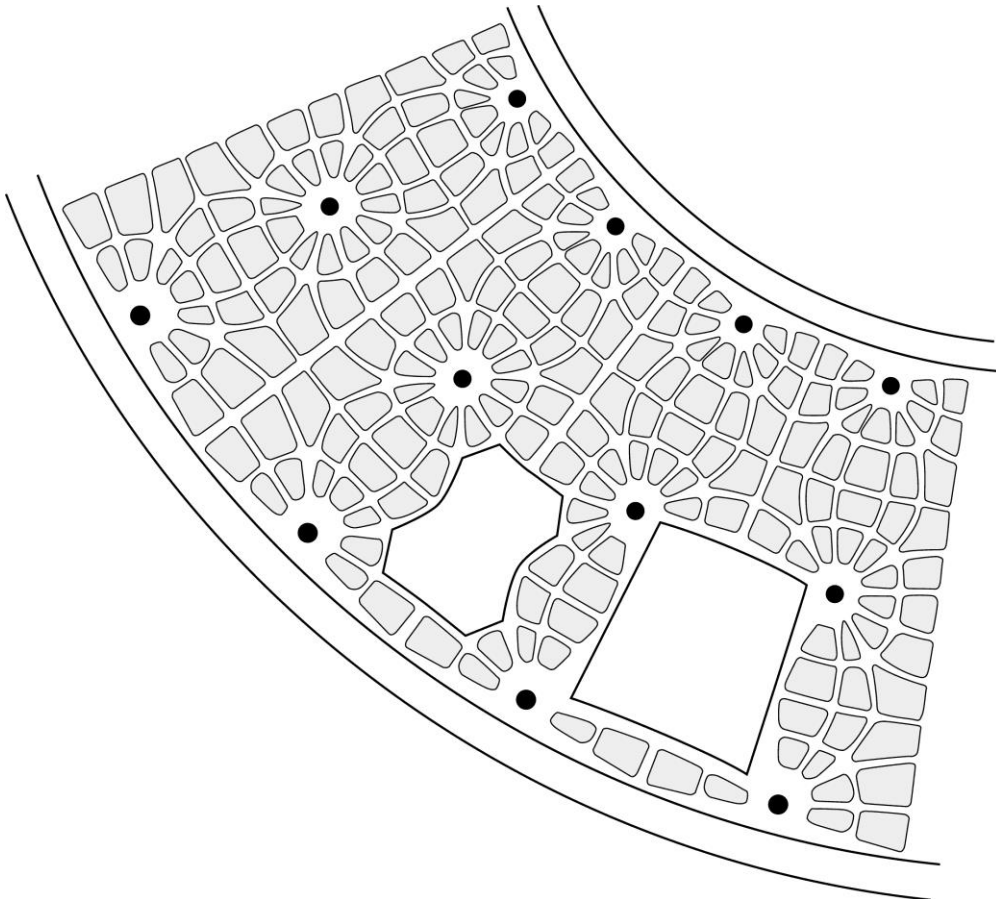


Figure 21 — Dalles isostatiques du projet pour le musée d'Oxford de Pier Luigi Nervi (dessin L.Vitalis, d'après Studio Nervi, Centro Archivi MAXXI, F3219)

— Le projet non réalisé de l'ambitieux centre sportif du Koweït (1968-1969) présente, parmi différents équipements, une typologie de gymnase de basketball couvert par un système de nervures isostatiques. La structure porte pour la première fois sur des appuis qui sont des plans courbes inscrits aux angles d'un carré d'environ 45 mètres de côté. Cette configuration statique renouvelle alors le dessin des lignes isostatiques. Mais avec seulement 8 éléments de formes différentes répétés 4 ou 8 fois, ce projet renoue aussi avec une économie de moyen. Cependant, au regard des dimensions importantes de certains caissons allant jusqu'à une dizaine de mètres la mise en œuvre devait compter sur des engins de levage particuliers.

²⁴ Voir dans le fond Nervi du Centro Archivi MAXXI, in P72/6, le dossier « Pitt Rivers Museum and Center for Anthorpological and Related Studies. Pier Luigi Nervi, Oxford, 21 March 1968 », et, en particulier, les dessins « first floor reflected ceiling plan - 1225/104 » et « details of rotunda construction using the « nervi construction system » - 1225/106 ».

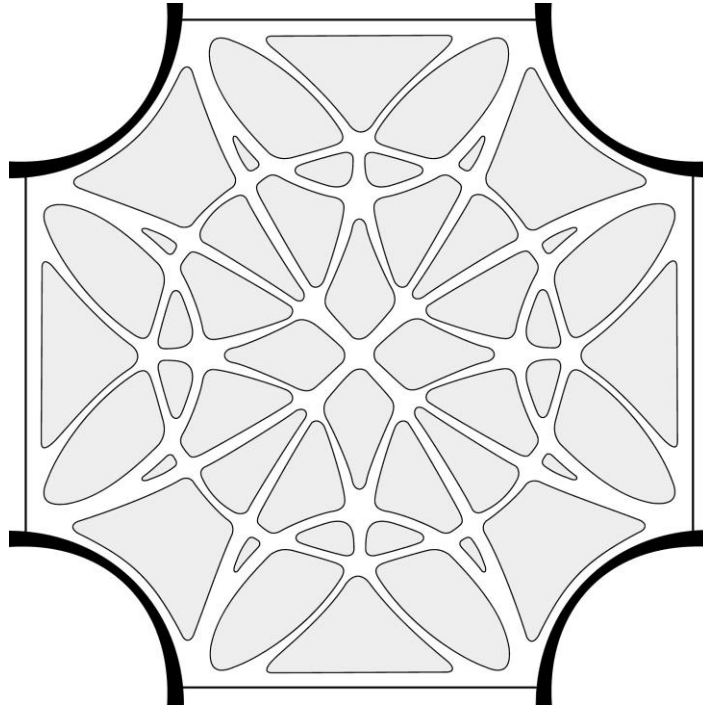


Figure 22 — Dalle à nervures isostatiques d'un gymnase pour le centre sportif du Koweït de Pier Luigi Nervi (dessin L.Vitalis, d'après, Pier Luigi Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 15, F6757)

— La tour du MLC center²⁵ à Sydney, en Australie (1970-1977), conçue avec l'architecte Harry Seidler met en œuvre, parmi différents dispositifs structurels, des nervures isostatiques d'un type original pour les étages de la tour. En s'appuyant à la fois sur un noyau central carré et sur des points périphériques répartis sur un carré de 42 mètres de côté aux angles biseautés, la configuration des lignes renouvelle encore le dessin des lignes isostatiques (Seidler, s. d.; « Sydney ribs », 1977). Il n'est pas évident néanmoins que ce dessin structurel corresponde à un optimum structurel. Pier Luigi Nervi s'étant retiré de l'activité de l'agence dans les années 1972-73 pour laisser la direction à ses fils (cf. Desideri, 2011, p. 122), ce projet a sans doute été terminé sans lui.

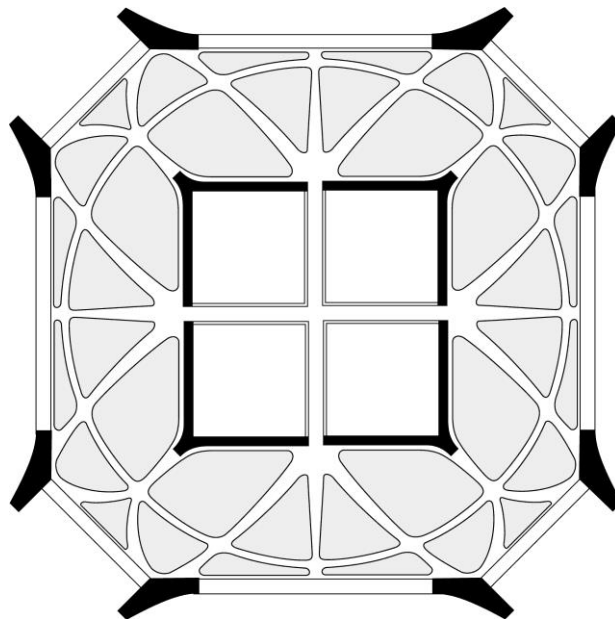


Figure 23 — Dalle à nervures isostatiques du MLC center à Sydney de Nervi et Seidler (dessin L.Vitalis, d'après site Harry Seidler, s.d.)

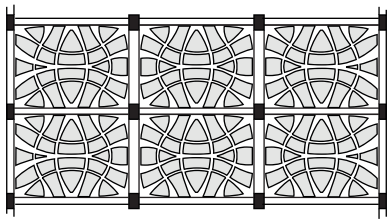
²⁵ Nommé d'après la compagnie d'investissements et d'assurances *MLC limited* qui y a des bureaux.

— Le projet pour la nouvelle foire internationale du Padoue (1973-1975) et celui de la couverture de la piazza du centre commercial Golden Acre au Cap (1975) semblent avoir été les derniers projets à développer des dalles à nervures isostatiques, vraisemblablement sans Pier Luigi Nervi. D'après le peu de documents relatifs à ces projets qu'il était possible de consulter, ces systèmes structurels ne semblent pas apporter d'innovations majeures aux lignées déjà développées.

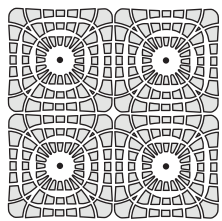
Ainsi, au-delà de cette présentation par ordre chronologique du travail de Pier Luigi Nervi entrevue projet par projet, il est possible d'en construire une vue d'ensemble. S'intéresser à l'évolution du système des dalles à nervures isostatiques fait alors ressortir les transformations et continuités globales (cf. Figure 24). Ces relations, ci-avant esquissées, au fur et à mesure des projets peuvent aussi permettre de dégager des lignées particulières à l'intérieur de la lignée des dalles à nervures isostatiques. La variante de la manufacture de tabac de Bologne, qui est sans doute le projet ayant véritablement inauguré les dalles à nervures isostatiques, initie une lignée des dalles portant sur des poutres périphériques qui sera développée dans plusieurs autres projets. Certains s'en écarteront en développant un système de dalle champignon, mais des systèmes mixtes, dalles champignons/poutres périphériques voient également le jour comme au Palazzo del lavoro de Turin. D'autres lignées ont été développées comme celle des plans courbes décomposés en trapèzes, où celle des plans carrés. L'église de Borgo Panigale ouvre une lignée qui n'a apparemment pas connu d'autres développements.

On peut alors repérer des opérations de conception qui sont à l'œuvre et explique les différences, en particulier des opérations de mise à l'échelle²⁶. Entre le Mémorial à Enrico Fermi et la Casa Risparmio de Venise, le nombre de nervures diminue alors que l'on est sur un schéma très similaire. Mais cela a lieu en parallèle d'un autre changement significatif, celui de la portée. Ainsi, une échelle technique tient compte de la taille des nervures pour ne pas descendre en dessous d'un seuil acceptable par la matière. Les ellipses et cercles centraux des dalles de la salle d'audience pontificale font figure d'anomalie et leur valeur structurelle est douteuse comme remarqué précédemment. Mais c'est sans doute une échelle symbolique formelle qui tient compte de la destination particulière du lieu et autorise cet écart. Si l'adaptation du plan orthogonal de la manufacture de tabac de Bologne au plan courbe du Palazzo dello sport apparaît semblable à celle qui fait passer du plan du Palazzo del Lavoro du Turin à celui de la Cathédrale de Portsmouth, les opérations diffèrent : c'est une échelle de visibilité qui organise circulairement les gradins du Palazzo dello sport et commande aux galeries périphériques cette forme. À Portsmouth la circularité est le produit d'une échelle de modèle qui reprend au déambulatoire entourant l'abside ses caractéristiques. Une échelle fonctionnelle détermine la très grande taille des dalles de la gare de Naples qui doit laisser passer des flux de voyageurs. Une échelle technique est vraisemblablement à l'œuvre pour rendre possible les caissons beaucoup plus grands des derniers projets que sont le Gymnase du Koweït ou le MLC center. La complexité atteinte pour le gymnase du Koweït s'explique sans doute par une volonté de changement après toutes ces dalles isostatiques déjà imaginés, mais elle est mise en œuvre par une échelle structurelle qui positionne les points d'appuis aux angles tout en étant ajustée par une échelle symbolique dimensionnelle qui aligne les arcs sur la taille d'un terrain de basketball. Bien d'autres aspects, tels que les matériaux ou les géographies des sites pourraient être interrogés pour comprendre plus finement l'évolution de ces nervures isostatiques.

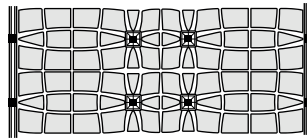
²⁶ Le terme est employé ici dans le sens formalisé par l'architecturologie qui fait référence pour sa précision conceptuelle (cf. Boudon et al., 1994/2000).



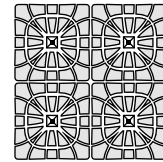
Manufacture de Tabac, Bologne
(1948-1949)



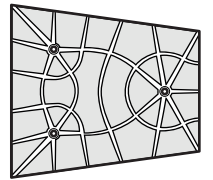
Brevet n°455678
(1949)



Manufacture de tabac, Rome
(1951)

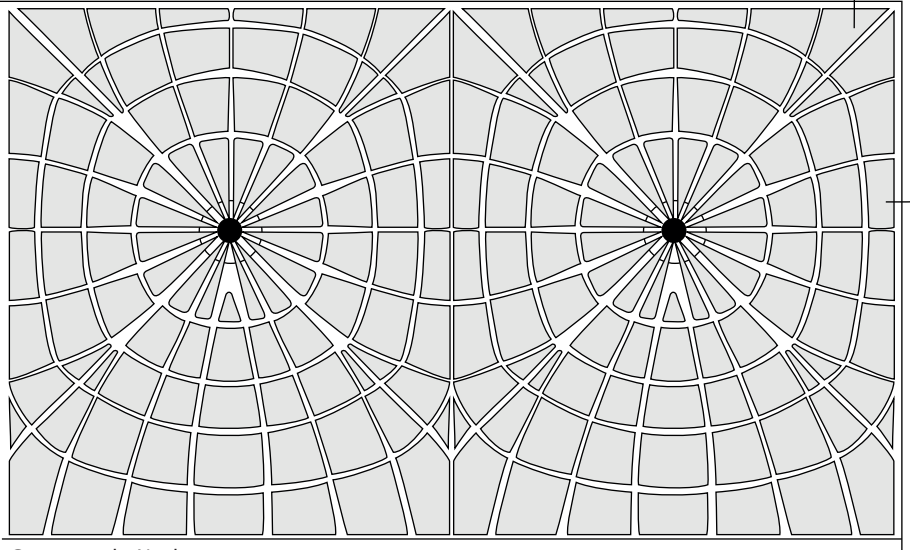


Lanificio Gatti, Rome
(1951)

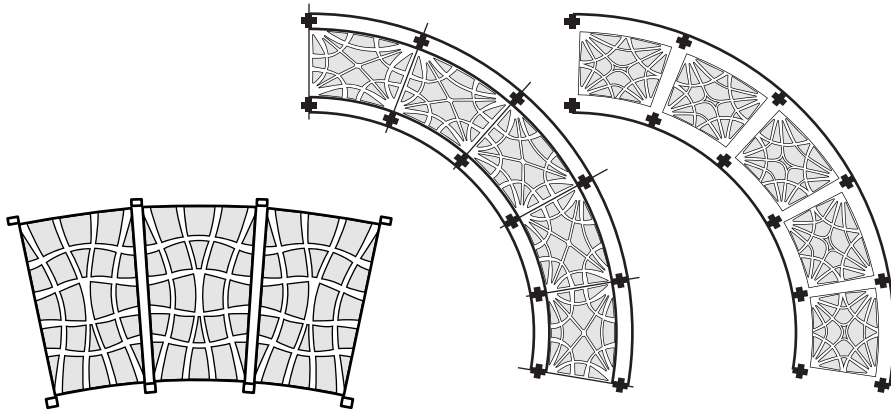


UNESCO, Paris
(1951-1958)

Figure 24 — Recueil et parallèle des dalles à nervures isostatiques conçues par Pier Luigi Nervi (dessins L. Vitalis)

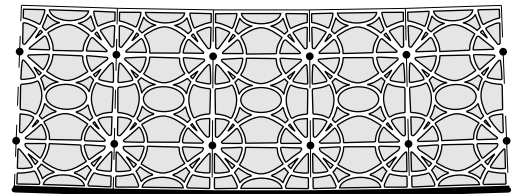
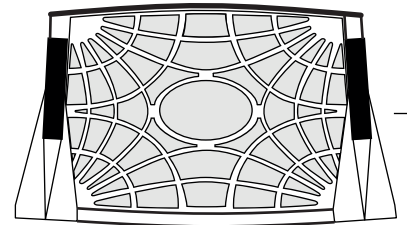


Gare centrale, Naples
(1954)

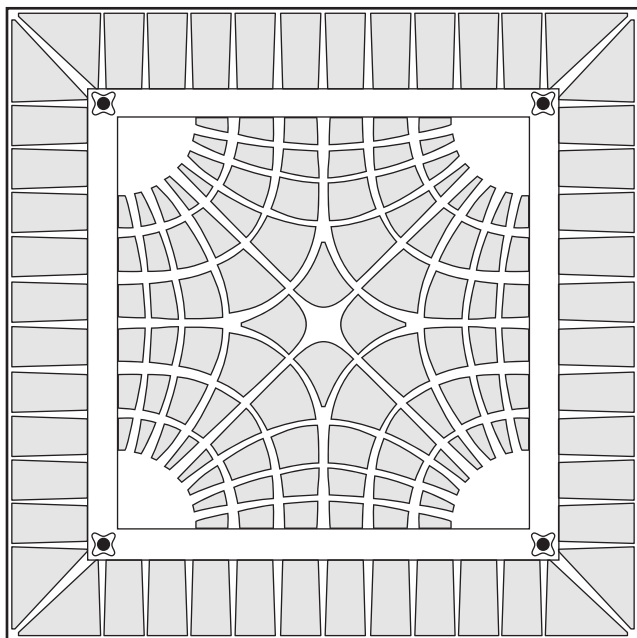


Palazzo dello sport, Rome
(1958-1959)

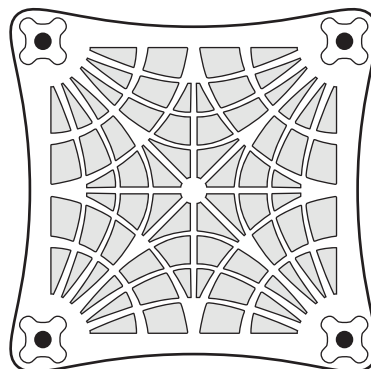
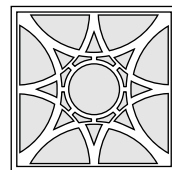
Cathédrale de Portsmouth, Royaume-Uni
(1964-1968)



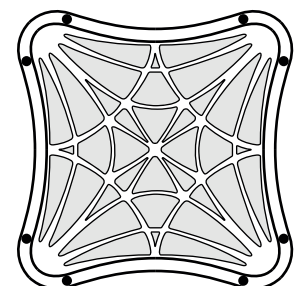
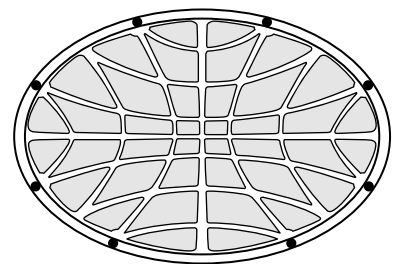
Salle d'audience pontificale, Rome
(1964-1971)



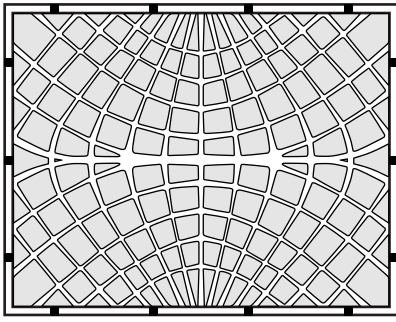
Mémorial à Enrico Fermi, Chicago
(1963-1966)



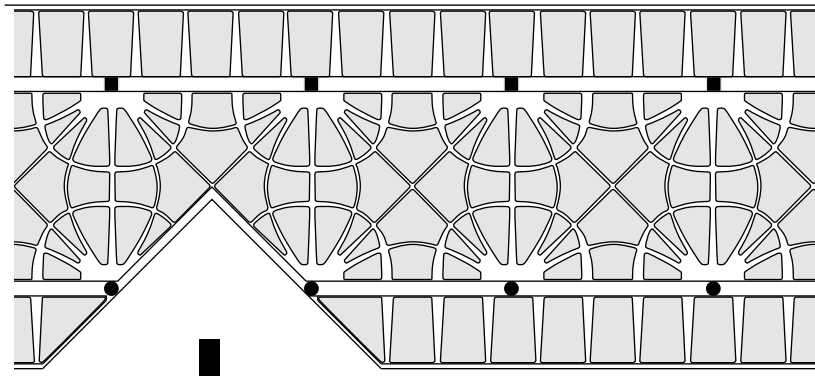
Casa di risparmio di Venezia, Venise
(1963-1975)



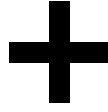
Centre culturel, Tripoli
(1966-1968)



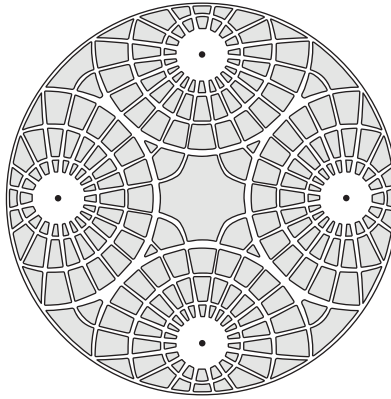
La Rinascence, Rome
(1957-1964)



Palazzo del lavoro, Turin
(1959)

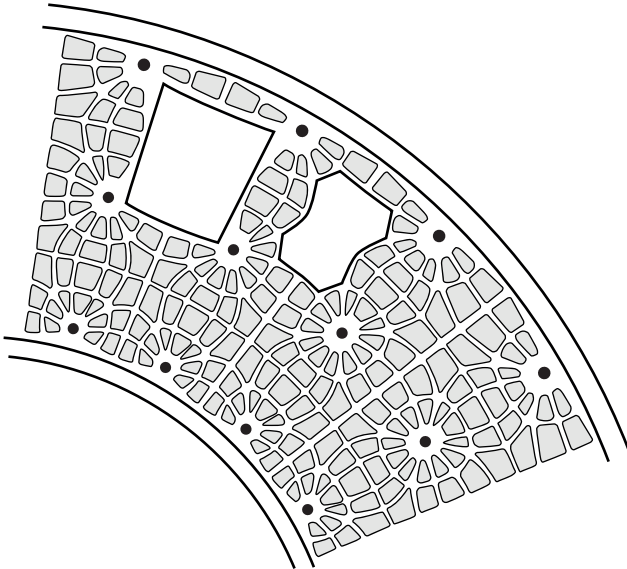


Lignée des appuis sur poutres périphériques,
dalles champignons et systèmes mixtes.



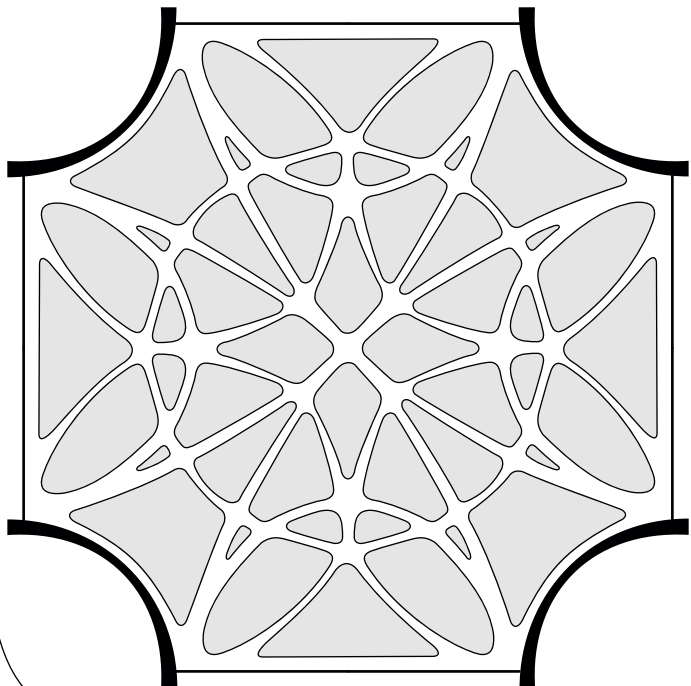
Eglise de Borgo Panigale, Bologne
(1955)

Lignée des plans circulaires

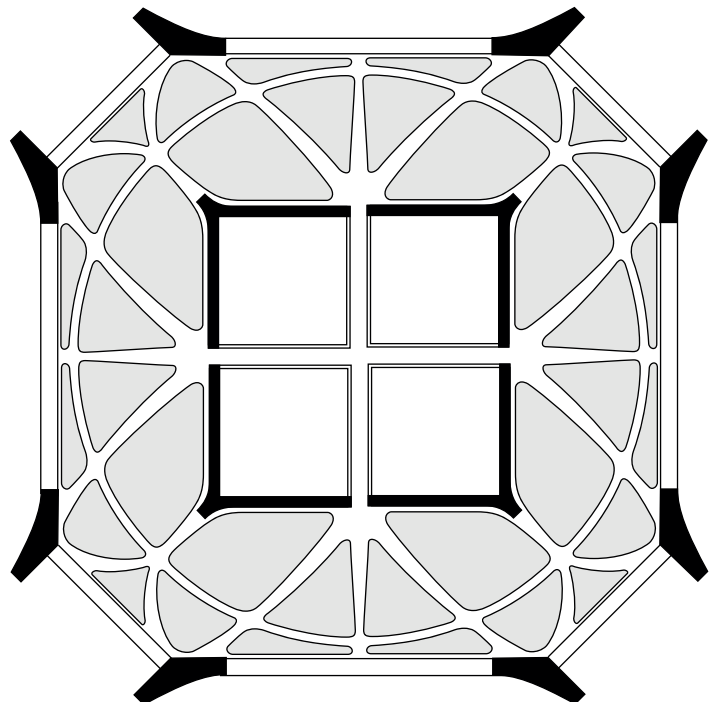


Musée et centre d'études anthropologiques, Oxford
(1965-1968)

Lignée des plans courbes décomposés
en portion trapézoïdales



Gymnase, Koweït
(1968-1969)



MLC center, Sydney
(1970-1977)

Lignée des plans à base carrée

Des auteurs ce sont interrogés sur la manière dont étaient construites ces courbes isostatiques, pour savoir si Pier Luigi Nervi et ses collaborateurs avaient suivi des méthodes mathématiques ou des méthodes expérimentales (Halpern et al., 2013). On trouve une réponse à cette question dans la correspondance de Pier Luigi Nervi conservée au Centro Archivi MAXXI. Dans une de ses lettres à Carlos Raul Villanueva de Caracas, il répond à son interrogation sur la manière de construire ces lignes :

« pour les planchers avec des nervures placées le long des lignes isostatiques des moments principaux, il n'existe pas (ou bien je n'ai pas pu trouver) une rigoureuse méthode de calcul, mais seulement des calculs approximatifs que, pour des grandes dimensions, comme celles des planchers de votre musée, ne donne pas une suffisante garantie. Pour des planchers de dimensions limités, comme ceux du "Lanificio Gatti" ou bien celui du Palais "Italia 61" a Turin, j'ai complété des calculs approximatifs avec des considérations constructives et tout est allé pour le mieux, mais pour des dimensions de 20 et plus mètres comme les vôtres et des charges si considérables, je crois nécessaire (si à Caracas il n'y a pas un théoricien capable d'instituer un calcul rigoureux) faire une recherche expérimentale sur modèle. » (in Centro Archivi MAXXI, C4, lettre du 25/07/1966)

Ces auteurs en considérant trois cas de figure montrent avec des techniques computationnelles récentes que le dessin des lignes isostatiques du Lanificio Gatti et du Palais du travail de Turin coïncide avec celles que l'on peut calculer avec des méthodes plus avancées. Les lignes de la galerie du Palazzo dello sport en revanche tendent à diverger de manière plus importante en certains endroits (Halpern et al., 2013). Il serait très instructif de poursuivre ce type de vérification sur les 18 projets de nervures isostatiques repérés ici.

Ce type d'analyse peut être poursuivi sur les autres lignées de projets concernés par les allégations de biomimétisme. Trois autres lignées ont pu être identifiées : les coupôles à nervures en forme de rosaces, les voûtes tripodes, et les voûtes à ondulations préfabriquées. Toutefois, je n'indiquerai ici que la direction générale d'une telle étude. Son approfondissement tend à excéder l'objet de ce rapport puisque la consultation des archives n'a pas mis à jour d'arguments soutenant une conception biomimétique.

Les coupôles à nervures rosacées

La coupôle à nervures de 60 m de diamètre du Palazzetto dello sport (1956-1957) conçue avec l'architecte Annibale Vitellozzi, se trouve prise de la même manière dans une séquence de projets. Le système constructif se base sur des caissons préfabriqués en ferrociment assemblés au niveau de leurs bords ourlés. Mis côte à côte ils forment alors des sillons dans lesquels est ensuite coulé le béton qui constitue des nervures rigides. Cette méthode constructive a été élaborée progressivement. Mis en œuvre sur la surface sphérique d'une coupôle ce système autorise, selon Pier Luigi Nervi, une grande liberté (Nervi, 1965a, p. 103). Les nervures et les caissons trapézoïdaux dessinent ainsi des motifs en forme de rosaces. De ce point de vue, la coupôle à nervures du Palazzetto dello Sport s'inscrit dans une lignée, à la suite de projets précurseurs :

Il faut d'abord considérer le hangar agricole à Torre di Pietra (1945) qui est le 1er projet où la voûte cylindrique se termine en une demi-coupôle. Le dessin des nervures raccordant les deux géométries est assez abrupt à ce stade.

Un autre précédent important dans cette lignée est la demi-coupôle du Salone Agnelli du Hall d'exposition de Turin commandé à Pier Luigi Nervi en 1949 (Nervi, 1965a, 1955/1997).

Construit avec le système de préfabrication, c'est une des premières réalisations du système où il développe un dessin de nervures avec une attention particulière à l'expressivité esthétique en adéquation avec la fonction du lieu.

Il développera encore ce système sur une structure champignon pour le réfectoire du pavillon Kursaal à Ostia, construit en 1950 (Nervi, 1965a, 1955/1997), puis pour une étude pour la couverture de l'Ara Pacis à Rome en 1951 (cf. la solution de type B, Centro Archivi MAXXI, FOT/2/1, F7420 ou encore l'ouvrage dirigé par Carla Zhara Buda (2016, p. 73)), puis encore sur un plan elliptique pour la rénovation des Thermes de Chianciano commandé en 1952 et conçu avec les architectes Marchi et Loreti (Nervi, 1965a, 1955/1997).

La coupole à nervures du Palazzetto dello Sport intervient à ce stade de développement. Elle précède également certains projets dans sa lignée. Il s'agit en particulier de l'étude pour une piscine couverte de la CONI (Comitato Olimpico Nazionale Italiano) à Rome (1964) conçue avec son fils Antonio Nervi (Buda, 2016, p. 101), de la nef centrale de l'extension de la cathédrale de Portsmouth avec Seely & Paget Architects (1964-1968), et de la salle de conférence du MLC Center conçu avec l'architecte Harry Seidler à Sydney (1970-1977). Le projet non réalisé pour l'édifice abritant le musée Pitt Rivers et le centre d'études anthropologiques à Oxford en Grande-Bretagne avec Powell and Moya Architects (1965-1968) comprend également un dôme-serre en son centre recréant une atmosphère tropicale. Ce dôme est conçu, sur les mêmes principes constructifs que le Palazzetto dello sport, avec une forme plus verticale, sa portée est de 40 mètres de diamètres pour 24 de haut²⁷.

Les voûtes tripodes

Pour la voûte triangulaire portant sur trois appuis du CNIT à Paris (1953-1956), Pier Luigi Nervi rejoint l'équipe de Robert Camelot, Jean de Mailly et Bernard Zehrfuss qui travaillent au projet depuis 1950. Pier Luigi Nervi imagine une structure réticulaire qui initie une lignée. Elle précède notamment le projet non réalisé pour la cathédrale de New Norcia (1958) pour lequel le même système a été repris et ramassé dans des proportions plus verticales (Gargiani & Bologna, 2016, p. 303). Une version de dimension plus réduite est également étudiée pour la couverture non réalisée du restaurant La Conchiglia a Fregene en 1960-61 (Buda, 2016, p. 87) d'une hauteur d'environ 5,5 mètres.

Les coupoles radiales à ondulations préfabriquées

Il est possible également d'ajouter le Palazzo dello sport qui, selon les éditions, est concerné par les discours biomimétiques. Sa coupole d'environ 100 mètres de diamètre avec ses ondulations disposées de manière rayonnante est le fruit d'une lignée, qui fait suite à certains projets précurseurs :

D'une part, le projet non réalisé pour la gare de Palerme étudié en 1946 (Huxtable, 1960, fig. 22), la voûte centrale du Salone Agneli à Turin (1947), la voûte projetée en 1949 pour le concours de hangar à avions non réalisé de Buenos Aires (Huxtable, 1960, fig. 43; Moretti, 1950), et la voûte de piscine de l'Académie Navale de Livourne (1950) sont les projets précurseurs qui ont d'abord développé les structures à ondulations préfabriquées sur des

²⁷ Voir dans le fond Nervi du Centro Archivi MAXXI, in P72/6, le dossier « Pitt Rivers Museum and Center for Anthorpological and Related Studies. Pier Luigi Nervi, Oxford, 21 March 1968 », et en particulier les dessins « first floor reflected ceiling plan - 1225/104 » et « detail of dome construction using the « nervi construction system » - 1225/107 ».

voûtes cylindriques et paraboliques. D'autre part, les porte-à-faux de l'auvent de la Foire de Milan (1947), et du pavillon Kursaal à Ostia, construit en 1950 (Nervi, 1965a), ont développé ces ondulations sur des plans courbes respectivement concaves et convexes. Le passage des porte-à-faux circulaires à la coupole referme le système structurel et aboutit en 1958 au système du Palazzo dello sport.

* * *

Il semble que la conception des projets mentionnés par les discours biomimétiques ne peut être comprise sans comprendre les lignées de projets dans lesquels ils s'inscrivent. Or ces processus font apparaître des continuités qui dépassent les projets mentionnés de manière isolée par les allégations de biomimétisme. Si des inspirations organiques sont intervenues, elles ne sont pas les seuls moteurs de la conception expliquant précisément les résultats conçus. De plus, il est notable que les dispositifs structurels qui auraient éventuellement été inspirés d'organismes naturels varient et sont transformés, bien après le moment de l'inspiration. S'il est effectivement vrai que les nervures isostatiques du Lanificio Gatti ont été inspirées du tissu spongieux des os, cela n'est pas suffisant pour expliquer comment les nervures isostatiques s'agrandissent pour la gare de Naples, s'adaptent à un plan trapézoïdal au Palazzo dello sport, ou se complexifient au gymnase du centre sportif au Koweït. De plus, le rôle effectif des os dans l'invention des nervures isostatiques n'est pas avéré puisque la variante du projet de manufacture de tabac de Bologne semble avoir précédé la mention du brevet n°455678 et qu'une inspiration à partir de motifs traditionnels indiens aurait également pu jouer un rôle dans cette invention.

V. La piste épistémique : les connaissances biologiques de Pier Luigi Nervi

L'étude de la situation épistémique de Pier Luigi Nervi vise à comprendre les savoirs, scientifiques ou non, dont il disposait, qu'il cherchait à acquérir et qu'il mobilisait dans ses projets²⁸. L'intérêt est, en particulier, de comprendre quel rapport il entretenait ou non avec les connaissances des sciences biologiques, puisque c'est un point sur lequel insistent les discours du biomimétisme. Pour ce faire, il a été possible de consulter la bibliothèque de l'agence²⁹, la correspondance de Pier Luigi Nervi³⁰ et sa documentation d'enseignant avec une attention particulière sur les sources et références mobilisées.

Ouvrages scientifiques

Le premier constat concernant les ouvrages est assez clair. La bibliothèque de l'agence de Pier Luigi Nervi ne contient pas d'ouvrages de sciences biologiques. Elle est composée principalement de textes techniques plus que scientifiques et couvre principalement le domaine du bâtiment, de l'ingénierie et des travaux publics et un peu celui de l'architecture. À titre d'exemple, on trouve l'ouvrage *Étude théorique et expérimentale d'un nouveau procédé de précontrainte* (1967), des numéros de la revue *Building digest, Il Cantiere, Domus* ou encore *Techniques et architecture*. Cette bibliothèque étant celle de l'agence, elle ne présume pas de l'ensemble des ouvrages possédés par Pier Luigi Nervi, il pouvait tout à fait disposer d'ouvrages de biologie à titre personnel. On peut retenir néanmoins que si ces ouvrages étaient en sa possession, il ne les destinait apparemment pas au travail de l'agence.

Une correspondance internationale, mais pragmatique

L'étude de la correspondance fait clairement émerger la dimension internationale de Pier Luigi Nervi et le montre comme un personnage important de la scène architecturale, estimé non seulement des architectes et ingénieurs, mais également de personnalités de divers horizons. Ainsi, il aurait été tout à fait à sa portée de correspondre ou de chercher à nouer une collaboration avec des biologistes. Pourtant, même s'il correspond avec des personnalités scientifiques, sa correspondance ne révèle rien de substantiel en ce sens.

Il échange, certes, avec des médecins. Mais lorsqu'il écrit au spécialiste du cancer Ulrich K. Henscke ou à Mauro Piemonte expert en radiothérapie³¹, c'est pour les remercier ou

²⁸ On distingue ainsi « épistémique » de « épistémologique », au sens où le 1^{er} terme renvoie à des connaissances dont dispose un ou des individus dans une situation, tandis que le 2^{ème} terme est réservé à l'étude rationnelle de la connaissance, scientifique en particulier, comme l'indique le suffixe « logos ».

²⁹ Comprenant 704 volumes et située au Centro Archivi MAXXI.

³⁰ Il s'agit d'une partie de la correspondance de l'agence. En particulier, ont été consultés au Centro Archivi MAXXI, les dossiers C2 à C7 qui couvrent une période allant principalement de 1965 à 1969, les dossiers C15 à C22 couvrant une période allant principalement de 1955 à 1966 et d'autres correspondances avec des universitaires, les dossiers R6 et R7 remontent au plus loin à 1955. Il faut noter que ces périodes ne coïncident pas tout à fait avec celles de l'élaboration des projets supposés biomimétiques qui s'étalent de 1951 à 1957. La correspondance accessible ne couvre pas en particulier la période d'élaboration du Lanificio Gatti dont la construction débute en 1951.

³¹ Lettres du 23/03/1964 et du 29/12/1964, C2/3 et C2/6 Centro Archivi MAXXI.

accepter de participer à une conférence du Circolo Culturale « Problemi d'oggi ». Il échange avec le physicien Emilio Segrè³², mais c'est pour parler de construction et le conseiller sur la couverture du Lawrence Radiation Laboratory. Lorsque le chimiste L.G. Manitius écrit à Pier Luigi Nervi pour lui dire l'intérêt qu'il porte à son travail, Pier Luigi Nervi ne cherche pas à échanger sur des aspects de la chimie, mais lui conseille son dernier livre *Structures*³³. Pier Luigi Nervi a accès aux annuaires du CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) qui lui sont envoyés, mais n'annote rien, ni dans les sections concernant la biologie, ni ailleurs et ne semble pas avoir cherché à contacter un des biologistes listés.

En plus des collègues de travail direct avec lesquels Pier Luigi Nervi échange au sujet de projets en cours de réalisation, il correspond surtout avec des historiens de l'art, des critiques et des écrivains (Alessandro Masi, Umbro Apollonio, Indro Montanelli, Garibaldi Marussi, Vittorio Branca, André Corboz, Pierre Francastel), des religieux (Gaetano Piccinini, don Giovanni Rossi, Giovanni Fallani, Alberto di Jorio), des artistes (Bernardino Palazzi, Jean Gorin, Walter Toscanini), des collègues architectes, ingénieurs et urbanistes (Constantinos A. Doxiadis, Pierre Vago, André Bloc, Kenzo Tange, Felix Candela, Andrault et Parrat, Hans Scharoun). De cette correspondance se dégage une personnalité très pragmatique et attachée au factuel. On trouve peu d'états d'âme ou de réflexions sur la conception ou sur les processus de pensée et les sources d'inspiration créatrices. Pier Luigi semble concentré sur l'objectif de la construction architecturale. Il est néanmoins possible de noter deux échanges qui nuancent ce constat sans toutefois le renverser.

Frei Otto, Johan-Gerhard Helmcke et les diatomées

En 1962, soit plusieurs années après le projet du Palazzetto dello sport (1956-1957) et du Palazzo dello sport (1958-1960), Frei Otto écrit à Pier Luigi Nervi pour lui parler d'un article qu'il prépare et dans lequel il entend comparer les structures à coques ou treillis aux Diatomées³⁴ et mentionne le travail du Prof. Helmcke du Max Planck Institut qui travaille sur les diatomées et les observe au microscope électronique stéréoscopique. Il propose de lui envoyer des photos de ces diatomées. Frei Otto dit avoir souvent pensé aux constructions de Pier Luigi Nervi en observant ces algues³⁵, et lui demande en retour des photos de ses édifices qui se prêteraient à la comparaison.

Pier Luigi Nervi répond en se disant très intéressé³⁶. Il reçoit finalement 27 photos de diatomées (cf. Annexe 1). Pier Luigi Nervi confirme son intérêt et s'arrête sur une image de diatomée en particulier : « Sono straordinariamente interessanti e una specialmente la 99/a 2.3 Surirella Gemma ha un espressività costruttiva che colpisce profondamente e fa riflettere sul totale valore di certe verità »³⁷ (cf. Annexe 1, n°26). Il demande que, si d'autres photos sont prises, de bien vouloir lui envoyer. Mais il ne s'enquiert pas de savoir ce que sont ces algues, ni où elles vivent, ni comment. L'échange s'arrête là pour un temps. Pier Luigi Nervi ne semble pas avoir particulièrement correspondu avec Johan-Gerhard Helmcke.

³² Plusieurs lettres, dont celle du 23/03/1964, R6/11, Centro Archivi MAXXI.

³³ Lettre du 17/10/1961, C19, Centro Archivi MAXXI.

³⁴ « [...] Schalentragwerke bzw. flächenbildende Gitterwerke menschlicher Herkunft mit den Schalen der Diatomeen (Kieselalgen) verglichen werden [...] », Lettre du 13/01/1962, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

³⁵ « [...] Beim Durchsehen dieses Materials mußte ich an Ihre so vollkommenen und diesen Naturgebilden oft sehr ähnelnden Arbeiten denken [...] », Lettre du 13/01/1962, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

³⁶ « Non ho ancora ricevuto les fotografie di ingrandimenti di diatomee che mi interessano enorme », Lettre du 01/02/1962, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

³⁷ Lettre du 05/03/1962, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

C'est Frei Otto qui relance Pier Luigi Nervi un an plus tard³⁸ en disant lui faire parvenir par envoi séparé un essai sur « Lebendige und technische Konstruktionen » et lui demandant un commentaire sur le premier volume de son livre « Zugbeanspruchte Konstruktionen », (Band I, Ullstein Verlag, 1962). Pier Luigi Nervi félicite alors Frei Otto pour son livre³⁹ et l'échange s'interrompt à nouveau. C'est encore Frei Otto qui revient vers Pier Luigi Nervi un an plus tard⁴⁰ en lui demandant cette fois des photos pour un documentaire de la « West German Television Authority of Hamburg ». S'ensuivent de brefs échanges et remerciements où il n'est plus question de Diatomées⁴¹. Il n'y a pas de traces d'autres échanges avec Frei Otto ou avec Johan-Gerhard Helmcke dans le dossier d'archives correspondant.

Toutes les photos envoyées à Pier Luigi Nervi se trouvent être des photos déjà publiées dans les quatre premiers des 10 volumes parus entre 1953 et 1977 du recueil photographique de diatomées édité par Johan-Gerhard Helmcke et Willi Krieger (soit 1953 pour le vol.1, 1954 pour le vol. 2, 1961 pour le vol. 3 et 1963 pour le vol.4). Les images envoyées à Pier Luigi Nervi, et des centaines d'autres, étaient donc en principe accessibles, mais dans les faits elles étaient diffusées à un public de spécialistes⁴².

L'image qui intéresse Pier Luigi Nervi est la table 99, légendée « *Surirella gemma* Ehrbg. Rekonstruktionzeichnung des Schalenrandes » qui signifie « dessin de reconstruction du bord de la coquille », publiée dans le 1^{er} volume de 1953. Elle est décrite par trois autres planches (les T97, 98 et 100) qui n'ont apparemment pas été envoyées à Pier Luigi Nervi. Dans ce livre, le commentaire à propos de cette diatomée précise qu'elle a été trouvée dans la mer du nord, et indique :

« Die in der Lichtmikroskopie als Testobjekt verwendete Schale (T.97 o.l.) ist nicht gewellt. Die Transapikalstreifen (T.98) bestehen aus kompliziert gebauten Kammern, die nach dem Zellinnern hin geöffnet sind. Innerhalb einer jeden Kammer springen leistenartige Verdickungen der Kammerwände gegen die äußere Schalenmembran vor, in der sie sich vielfach verzweigen und dünne Siebmembranen zwischen sich frei lassen (T.100). Zwischen 5 bis 10 Transapikalstreifen verlaufen Rippen, die den Winkel zum Raphenkanal überspannen. Die Fenster zwischen dem Zellinnern und dem Raphenkanal sind unterschiedlich groß und stoßen dicht aneinander (T.97 u. und 99). » (Helmcke & Krieger, 1953, p. 19 vol.1)

Dans leur introduction, les auteurs indiquent que les recherches des diatomées se sont jusque-là limitées à la morphologie des coquilles et qu'elles se sont peu intéressées à la physiologie et au développement de ces organismes. L'étude de la morphologie étant une étape préliminaire nécessaire, leur livre se veut une présentation systématique, un atlas, destiné à être la base pour des recherches sur la physiologie et du développement. (Helmcke & Krieger, 1953, p. 3 vol.1). Or, déconnecté des autres planches et des commentaires et sans même savoir où a été trouvé cet organisme, Pier Luigi Nervi en a une appréhension uniquement visuelle. Il ne peut s'en tenir qu'à la morphologie.

Si l'on tient à l'hypothèse d'un biomimétisme de Pier Luigi Nervi inspiré des diatomées, on peut remarquer qu'une image de diatomée *Arachnoidiscus* citée par Göran Pohl et Werner

³⁸ Lettre du 18/01/1963, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

³⁹ Lettre du 14/03/1963, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

⁴⁰ Lettre du 03/05/1964, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

⁴¹ Lettre de Pier Luigi Nervi à Frei Otto du 12/06/1964, réponse du 21/06, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

⁴² L'ouvrage n'est pas indexé dans le catalogue national des bibliothèques italiennes (opac.sbn.it). Le catalogue français (www.sudoc.abes.fr) indique qu'il est disponible en seulement deux endroits : la station marine de l'Université d'Aix Marseille et la bibliothèque spécialisée de botanique du Museum d'histoire naturelle de Paris.

Nachtigall a effectivement été envoyée à Pier Luigi Nervi (cf. Annexe 1, n°5), même si ce n'est pas la même image que celle figurant dans leur ouvrage et que ce n'est pas celle qui a retenu son attention. Si l'aspect rayonnant de la diatomée *Arachnoidiscus* peut avoir quelque similarité avec la coupole du Palazzo dello sport, il n'est pas évident que la coquille avec ses petites ouvertures circulaires soit adaptée à une résistance en compression du type de celle à laquelle est soumise une coupole de 100 mètres de diamètre. La photo de la diatomée ne fournit pas non plus d'indication pour la préfabrication des ondulations radiales, ce qui est aux yeux de Pier Luigi Nervi l'invention majeure du Palazzo dello sport (Nervi, 1965a, p. 106-107).

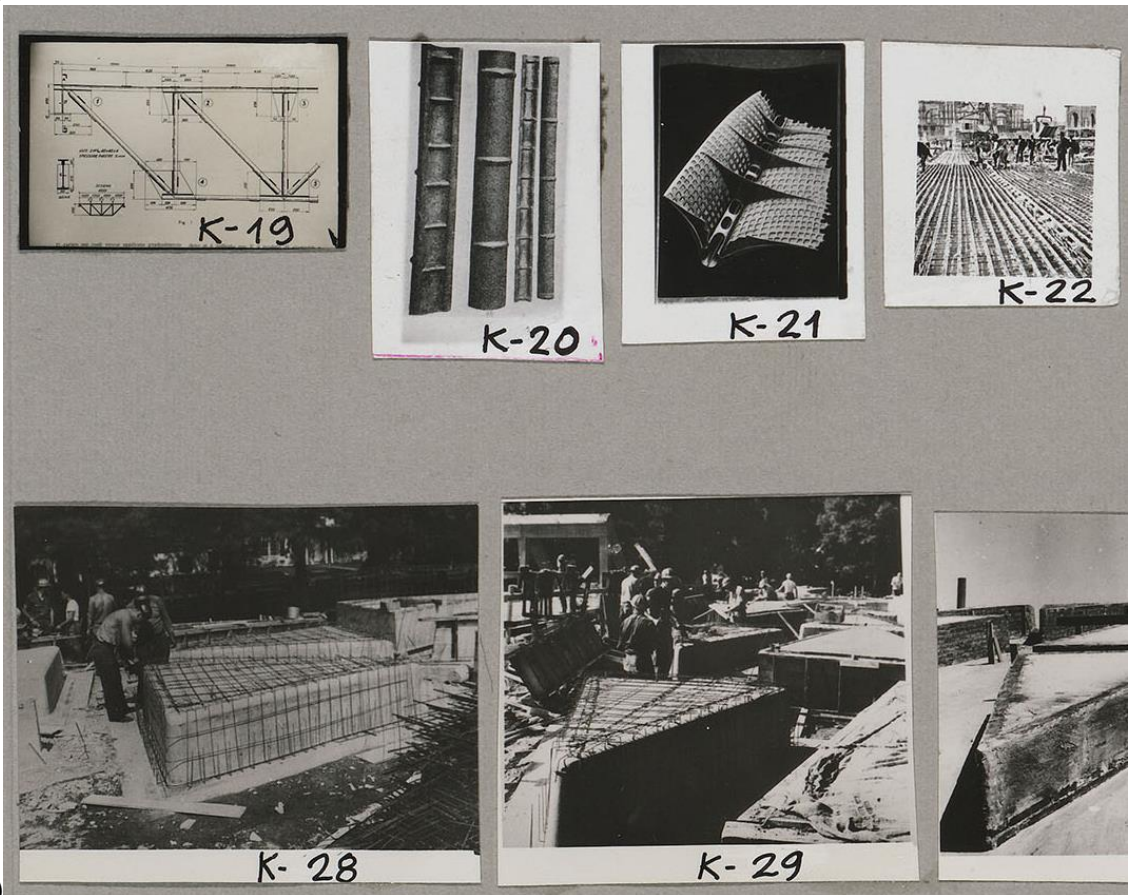
Pour ce qui est de la diatomée *Surirella gemma*, l'image montre un élément triangulaire que l'on peut vouloir dire analogue — si on laisse de côté sa taille, la connaissance de sa fonction biologique, etc... — aux éléments raidisseurs que Pier Luigi Nervi invente pour les ondulations du Salone Agnelli à Turin et nomme « diaphragmes ». Dans les deux cas l'envoi des photos de diatomées à Pier Luigi Nervi (1961) est postérieur à la conception du Palazzo dello sport (construction achevée en juin 1959), comme du Salone Agnelli (1947). Pour qu'il ait pu s'en inspirer, il aurait donc fallu qu'il ait eu connaissance de ces diatomées par d'autres voies.

Si la découverte de cette diatomée était marquante, on peut s'interroger sur les conséquences ultérieures de cet événement. Pier Luigi Nervi conservait de nombreuses épreuves photographiques, beaucoup représentent ses propres projets, mais il collectionnait également des épreuves de différents édifices anciens et récents, mais aussi de bateaux, voitures et avions dont il aimait mettre en perspective l'évolution des formes au cours de l'histoire. Il les organisait dans des albums qui sont pour la plupart des monographies de ses projets et devaient sans doute servir à la promotion de l'activité de l'agence à la manière de portfolios. Quelques-uns de ces albums cependant, mettent sur un même plan différents édifices selon des similarités techniques ou fonctionnelles. Et un de ces albums en particulier rassemble ces projets avec des édifices pris dans l'histoire de l'architecture et d'autres objets. On y voit alors apparaître l'image de la diatomée *Surirella gemma* (cf. Figure 25). Il est intéressant de remarquer qu'elle est associée à une image de bambou sectionné (à gauche) qui présente également des sortes d'éléments raidisseurs, une image peu reconnaissable, probablement de chantier (à droite), des photos des coffrages et du chantier de la couverture de son projet de salle omnisport pour le Dartmouth College à Hanover dans le New Hampshire (en dessous). Plus loin à droite figurent également les dessins des nervures isostatiques de la salle d'audience pontificale et du centre culturel de Tripoli. Ces images sont rassemblées sous la légende « sistemi costruttivi speciali e prefabricazioni in generale ».

Il semble ainsi que, marqué par une des photos de diatomée, Pier Luigi Nervi l'ai intégré dans son univers formel, principalement pour la valeur structurelle réalisée par un « système spécial ». Sans doute cela tient aux éléments intermédiaires qui peuvent être interprétés comme ayant une fonction de raidisseur. Ce serait alors une interprétation de cet organisme qui est reconstruite à partir de sa forme et indépendamment d'une connaissance biologique plus complète de son milieu, de son développement ou de sa physiologie.



(a)



(b)

Figure 25 — (a) planche « sistemi costruttivi speciali e prefabbricazioni in generale » et (b) détail montrant la *surirella gemma* en K-21 (Pier Luigi Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 19, K-001-035)

Le Lanificio Gatti, les os, les feuilles et le gothique

En 1961, soit dix ans après le projet du Lanificio Gatti, Pier Luigi Nervi reçoit une lettre de l'architecte Seymour Howard⁴³ lui envoyant son article, « A new look at flat plate construction », dans lequel il met en parallèle les planchers du Lanificio Gatti avec les nervures de feuilles et la section d'un os. D'après lui, « when we are confronted with the isostatic ribs of the Gatti Wool Mill, for example, we are intuitively and consciously aware of the correspondence with the ribs of a leaf » (Howard, 1961, p. 194). Un passage est souligné en marge, sans doute par Pier Luigi Nervi ou un de ses collaborateurs :

« the reason is that « structure » by itself is only a concept which is meaningless without reference to some more primary purpose. The objective underlying the form of the leaf is to expose the maximum number of cell to the sunlight. Its flat shape solves this best and the structure must conform to it, even though ribs subject to bending moments are less efficient than structural elements loaded purely in tension or compression. Even these ribs are given their form as much from their function as food arteries as from structural requirements. An animal must walk or fly or swim. The complicated structure of bones and ligaments and muscles must conform to the mechanical requirements of stability and propulsion. The design of buildings should follow the same principle. The primary form should be given by the need for certain spaces for human activities. » (Howard, 1961, p. 194)

C'est sans doute le rapport entre forme et fonction qui intéresse ici Pier Luigi Nervi. Le reste de l'article traite cependant de questions d'ingénierie de la construction. Aucune réponse de Pier Luigi Nervi ne figure dans le dossier d'archives correspondant.

Quelques années plus tard, Pier Luigi Nervi publie un article dans la revue des étudiants de la Design School de North Carolina College Raleigh. (Nervi, 1963b). Il est placé dans un numéro à deux articles, juste après un texte sur les voûtes nervurées gothiques de l'historien de l'architecture Augusto Cavallari-Murat. Les éditeurs ont encadré le début et la fin du numéro par des images d'os sectionnés et une citation de D'Arcy Thompson sur l'efficacité mécanique de la matière des trabeculae. Pourtant ni les os, ni d'Arcy Thompson ne sont mentionnés dans les deux articles. On trouve ainsi plusieurs interprétations de ce type du vivant de Pier Luigi Nervi qui a eu conscience de ces associations. Qu'il ait été en accord ou non avec elles, il ne semble pas avoir cherché à les réfuter.

Métaphores et images naturelles dans la pensée de Pier Luigi Nervi

Si Pier Luigi Nervi ne semble pas s'être intéressé à la biologie ni aux sciences du vivant, il faut néanmoins mentionner son intérêt pour les objets de ces sciences : les organismes naturels. Il faut donc faire une place à un ensemble d'approches non scientifiques, mais métaphoriques et analogiques qui parsèment le vocabulaire et certains discours de Pier Luigi Nervi. Il s'agit d'un mode de connaissance particulier, un mode d'appréhension du monde et de représentations cognitives fonctionnant par rapprochements et ressemblances.

Pier Luigi Nervi utilise fréquemment la métaphore de l'organisme pour désigner un rapport des parties au tout fortement cohérent et où le tout transcende la somme des parties. Il l'utilise à la fois pour parler des matériaux qui « pris au détail, n'ont en eux-mêmes aucune valeur ni possibilité d'utilisation », mais trouvent leur sens dans l'ensemble qu'ils forment et répondent à une fonction (Nervi, 1955/1997, p. 27), mais aussi de la structure, en parlant du

⁴³ Lettre du 9/09/1961, C18, R7/6, Centro Archivi MAXXI.

fonctionnement interdépendant des éléments des hangars pour avions d'Orvietto (1935) : « this was no longer a combination of trusses and beams, but a single resisting organism where the stresses due to its own weight and the external forces of wind and snow could be spontaneously diffused until they reach the supports » (Nervi, 1965a, p. 26). Il pousse la métaphore jusqu'au rapport entre l'organisme et son milieu : « chaque structure en béton armé est un organisme en soi, dont les caractéristiques statiques sont influencées par des facteurs impondérables, tenant à la réalisation et au milieu » (Nervi, 1955/1997, p. 90).

Toutefois, l'organicité et le rapport des parties au tout, sont des thématiques usuelles de l'architecture et ne renvoient pas nécessairement à un référentiel biologique. L'idée d'une architecture organique renvoie à un mouvement dont Frank Lloyd Wright était l'un des acteurs centraux, mais également Bruno Zevi en Italie. Pier Luigi Nervi appartenait justement à l'APAO (Associazione per l'Architettura Organica)⁴⁴. Il possédait également le livre de Frank Lloyd Wright *Drawings for a Living Architecture*⁴⁵.

Pier Luigi Nervi mobilise également la métaphore du vivant en un sens qui lui est propre. Depuis son étude sur les fissures du dôme de Santa Maria del Fiore de Florence, les déformations causées par des variations thermiques sont un de ses points d'attention privilégiés. Il parle alors d'« una specie de vitalità dei muri e delle pietre, in qualche modo analoga alla vitalità delle piante e degli animali » (Nervi, 1945, p. 14). Ayant mesuré les déformations du béton dans la deuxième série de ses hangars à avions d'Orbetello commandés en 1939, il a observé le mouvement variable du béton après démontage des échafaudages. L'équilibre trouvé par la structure dans la redistribution des efforts après le retrait des appuis provisoires apparaît comme imprévisible (Nervi, 1965a, p. 99-100). Il ira même jusqu'à considérer les déformations thermiques comme un « ennemi » (Einaudi, 2010, p. 71).

Il utilise alors le terme de physiologie pour désigner la connaissance de ces fluctuations. Par exemple: « la scienza delle Costruzioni è una specie di fisiologia teorica che studia le condizioni di funzionamento di un organismo fatto vivere in astratte condizioni di eterna giovinezza ; una scienza che ignora la vecchiezza la malattia e le loro cause » (Nervi, 1950, p. v). La notion de vitalité des structures joue un rôle dans l'argumentation qu'il tient au sujet de la science des constructions et de l'emploi des mathématiques qu'il n'aura cesse de critiquer pour insister sur l'importance des intuitions et de la sensibilité statique. Devant la complexité des facteurs en jeu rendant illusoire la précision des calculs, Pier Luigi Nervi mobilise l'idée de « vie statique » des structures (« vita statica » Nervi, 1945, p. 9-10) pour fonder la nécessité de l'intuition. On peut voir dans ce passage l'expression d'une sorte de vitalisme, au sens ou le terme de « vie » cherche à poser la technique comme inaccessible à une compréhension scientifique rationnelle⁴⁶.

La question des structures perçues comme vivantes joue aussi un rôle didactique. La représentation des structures comme des êtres vivants permet à l'enseignant qu'est aussi Pier Luigi Nervi, de transmettre sur un mode analogique ses connaissances structurelles (Manfredi Nicoletti cité par Castelli, 2011, p. 17; Portoghesi et al., 2011, p. 186).

⁴⁴ Il est invité en tant que membre à une réunion dans une lettre du 2/02/1955, Lettre du 14/03/1963, C15, Centro Archivi MAXXI.

⁴⁵ Voir la facture de la Librairie d'art ancien et moderne du 15/7/1960, C19 Centro Archivi MAXXI.

⁴⁶ Ce point fait l'objet d'un développement particulier dans le § *La question des « lois de la nature »*, ci-après.

Nervures, champignons, diaphragmes...

Si ces métaphores restent à un niveau général, ne faisant pas référence à un organisme vivant en particulier, d'autres sont plus précises. Pier Luigi Nervi désigne du nom de « nervures » (en italien : « costolone » ou « nervatura » : côtes, nervures et nerfs qui sont traduits en anglais par « ribs » : côtes ou nervures), des éléments raidisseurs caractéristiques de son architecture.

Il est aussi régulièrement question de champignons. C'est ainsi que sont qualifiés les grands piliers du Palazzo del lavoro de 1961 ou les seize poteaux de l'église pour le quartier ANIC de Ravenne, (in *Chiesa di Ravenna : relazione architettonica*, in P79, Centro Archivi MAXXI).

Pour qualifier les éléments raidisseur de la voûte ondulée du Salone Agnelli à Turin, c'est le terme de diaphragme qui est utilisé en italien comme en anglais :

« The static and construction analysis showed both the necessity of making each element rigid enough to resist the handling erecting stresses and the necessity of easing the joining process. This was achieved by placing a rigid diaphragm on either end of the element. » (Nervi, 1965a, p. 101)

Dans la traduction française, langue que Pier Luigi Nervi maîtrisait, il est question de tympan (Nervi, 1955/1997, p. 116)

On notera toutefois que la fonction auquel répond ce « diaphragme » n'est pas celle du diaphragme des corps vivants pour lesquels il a une fonction respiratoire ; c'est le mouvement du muscle qui importe pour l'organisme, pas sa raideur. Il en va de même du tympan de l'oreille qui transmet les vibrations sonores du fait de son élasticité.

Enfin, une analogie générationnelle est également mobilisée pour décrire le processus de production des éléments préfabriqués des voûtes nervurées comme celle du Palazzetto dello sport de Rome. La méthode proposée par Pier Luigi Nervi est de fabriquer d'abord un exemplaire de chacun des éléments qui sont dits « grand-mères ». À partir de ces éléments sont fabriqués une petite série d'éléments « mères », tous identiques puisque moulés sur les « grands-mères ». Ce sont finalement les éléments « filles » issus des « mères » qui sont fabriqués pour être mis en œuvre sur la voûte (Iori, 2012).

L'extensivité des analogies au-delà de l'organique

Mais il semble important de comprendre que ces analogies ne sont pas limitées au monde vivant ou organique. Elles ne sont d'ailleurs pas limitées puisqu'elles reposent par principe sur une approche par ressemblance. Pier Luigi Nervi se réfère ainsi souvent à l'architecture gothique comme une source d'inspiration édifiante. Il perçoit même les lignes isostatiques dans les nervures de l'architecture gothique (Nervi, 1965a, p. 7). Dans ses albums, les planches mettent justement sur un même plan différents édifices ou références. Les associations sont établies à partir de similarités morphologiques, historiques, fonctionnelles ou constructives. À l'exception de la diatomée et du bambou, mentionnés précédemment (cf. Figure 25), on ne trouve pas sur ces planches d'organismes vivants. Des projets de Pier Luigi Nervi sont par exemple regroupés dans la catégorie « édifices religieux et sanitaires » avec des églises gothiques (cf. Figure 26).



Figure 26 — Extraits des planches « Edifici religiosi e sanitari »
 (Pier Luigi Nervi, Centro Archivi MAXXI, Album 19, D-001-079 et D-150-216)

Ces associations par ressemblance fonctionnent en quelque sorte à la manière de l'Atlas mnémosyne d'Aby Warburg⁴⁷. Cela signifie implicitement un projet épistémique qui passe par l'image. Pourtant sans le commentaire de Pier Luigi Nervi, il reste difficile de saisir le sens de ces associations ; les édifices sont-ils mis côte à côte pour les distinguer ou pour les rapprocher ? et par rapport à quel critère ?

Pour traiter des analogies dans l'appréhension des objets architecturaux et naturels chez Pier Luigi Nervi, il faut aussi revenir à un des thèmes chers à Pier Luigi Nervi, celui de la structure par la forme. Pour expliquer ces systèmes dont « la capacité statique est une conséquence directe des courbures ou des plis donnés à une surface » (Nervi, 1955/1997, p. 143), il a recours à des organismes naturels qu'il mêle à des objets artificiels comme des chapeau ou des abat-jour. Comme cela a déjà été remarqué au sujet de la citation tronquée de Juri S. Lebedew, c'est une ontologie particulière dans laquelle le caractère vivant ou non des objets ne joue aucun rôle.

Une anecdote raconte pourtant que Pier Luigi Nervi aimait poser une feuille d'arbre le matin sur sa table à dessin pour la garder sous les yeux en travaillant⁴⁸. C'est sans doute le type d'observation auquel il se livrait, mais il observait aussi bien les objets de son quotidien.

Si les analogies s'étendent ainsi bien au-delà du monde organique Pier Luigi Nervi pose dans certains cas une limite aux associations à tout va. Il semble avoir placé la démarcation au niveau du matériau de construction. Suite à une demande, pour une exposition à Barcelone, d'envoyer des photos de ses édifices en rapport avec l'architecture d'Antonio Gaudí, Pier Luigi Nervi répond :

« Esclusa in modo totale qualsiasi considerazione meno che riguardosa verso l'opera dell'Arch. Gaudí, non vedo in tutta sincerità quale collegamento o legame si potrebbe stabilire tra le Sue opere e le mie. Se non altro per il fatto che tutte le mie progettazioni tragogono della loro espressività da procedimenti esecutivi del cemento armato studiati da me stesso e diversi da quelli impiegati dall'Arch. Gaudí. »⁴⁹

Si le béton armé est à l'origine de l'expressivité des projets de Pier Luigi Nervi, on peut supposer des structures organiques — procédant d'une matérialité encore plus éloignée que celles d'Antonio Gaudí—, qu'elles ne devraient pas avoir plus de rapport à ses yeux. De même, lorsque l'architecte grand prix de Rome, Serge Menil lui écrit pour lui envoyer sa publication « La théorie des fuseaux »⁵⁰ (extrait de L'architecture Française n°219-220), qui se veut une théorie d'un urbanisme organique d'un nouveau type, prenant en compte la croissance de la ville, Pier Luigi Nervi répond en le remerciant d'une phrase laconique, sans chercher à approfondir ou questionner cette analogie entre architecture et organisme vivant⁵¹.

⁴⁷ Cette interprétation m'a été proposée par Elisabetta Margiotta Nervi lors d'un entretien téléphonique le 23/07/2021.

⁴⁸ Cette anecdote m'a été rapportée par Elisabetta Margiotta Nervi lors d'un entretien téléphonique le 23/07/2021.

⁴⁹ Lettre de à l'architecte Cesar Martinell Brunet (Colegio Oficial de Arquitectos de Catalunya y Baleares) du 8/02/1968, C5, Centro Archivi MAXXI.

⁵⁰ Lettre du 19/05/1961, C19, Centro Archivi MAXXI.

⁵¹ Lettre du 31/05/1961, C19, Centro Archivi MAXXI.

La question des « lois de la nature »

Pier Luigi Nervi fait à de multiples reprises référence à ce qu'il nomme les « lois de la nature ». Elle sont d'après lui un facteur déterminant de son architecture et il chercherait à adhérer à ses lois (Nervi, 1965a, p. 185). Il dit la nécessité de « progettare secondo natura » (Nervi, 1939). La notion de loi étant un élément important de la structure des sciences, cette expression pourrait être le signe d'un recours de Pier Luigi Nervi à des sciences biologiques et mérite donc un éclaircissement.

En cherchant à comprendre ce que signifie l'expression « loi de la nature » dans les discours de Pier Luigi Nervi, il faut d'abord remarquer que l'expression « lois physiques » figure souvent dans les mêmes passages (Nervi, 1965a, p. 185). Les « lois de la nature » et les « lois de la physique » semblent ainsi souvent interchangeableables dans les textes de Nervi, mais aussi de ses commentateurs (Trentin, 2010). Ces lois sont parfois plus précisément qualifiées de « lois de la statique » (Nervi, 1965c), voire même de « legge statiche e tecniche » (Nervi, 1945, p. 22) ou encore :

« Aggiungo, leggi fisiche o leggi tecniche, perché anche la tecnica, nei suoi prodotti, è sempre appoggiata a qualche cosa che non dipende dal nostro capriccio » (Nervi et al., 1966, p. 19)

La nature au sens de la *phusis* grecque est, en effet, l'objet de la physique, dont la mécanique statique est l'une des branches. Il y aurait donc un malentendu à déduire de l'expression « lois de la nature » une relation aux sciences biologiques. Les objets réglés par les lois de la nature auxquelles fait référence Pier Luigi Nervi ne sont pas spécifiquement vivants. S'il se peut parfois qu'ils soient vivants, la physique les traite comme inertes, de la même manière que des artefacts. Ce sont les moments de flexion, la logique structurelle et d'équilibre des charges qui l'intéresse.

Si ce point est important à souligner, c'est parce que l'une des justifications de l'intérêt du biomimétisme est basée sur la théorie de l'évolution ; par le biais de la sélection naturelle, les êtres vivants ayant survécus sont ceux qui présentent des caractères avantageux les rendant mieux adaptés dans un environnement. Ces organismes êtres constitueraient donc des sources opportunes pour les inspirations des ingénieurs d'aujourd'hui. Cet argument est poussé à son apogée lorsque Janin Benyus qualifie la nature d'ingénieur et l'évolution de processus de recherche et développement (Benyus, 1997/2002). Or si Pier Luigi Nervi s'inspire autant des êtres vivants que des artefacts et que ce n'est pas en leur qualité de vivant qu'il s'intéresse à des organismes naturels, toute allégation de biomimétisme à son endroit est alors problématique.

Il faut aussi ici noter le rapport ambigu que Pier Luigi Nervi entretenait avec les lois au sens scientifique du terme. Cela apparaît dans les développements qu'il consacre à la science des constructions et à l'emploi des mathématiques pour les systèmes hyperstatiques dans son premier livre. Il porte en particulier un regard critique sur le fait que la science de la construction se base sur la loi de Hooke qui suppose une proportionnalité directe et constante entre sollicitation et déformation. Cette loi est en désaccord avec ce qui est observé avec certains matériaux comme le béton. Pier Luigi Nervi va alors implicitement opérer une distinction entre des « lois de la nature » auxquelles il reste attaché et des lois connues de la science des constructions et éventuellement traduites en équations qui lui semblent problématiques. Pour comprendre ce que sont les lois de la nature pour Pier Luigi Nervi, il faut comprendre ce qu'il rejette. Le second type de lois est pour Pier Luigi Nervi problématique parce qu'en décalage avec la réalité, les calculs qui en découlent sont non seulement difficiles, mais ils ont un caractère abstrait qui éloigne les étudiants de la

compréhension du monde statique. Il juge l'exactitude de ces calculs illusoire (Nervi, 1945, p. 28). Ce recours à la réalité comme pouvant réfuter une théorie scientifique est épistémologiquement problématique. Elle révèle une philosophie scientifique spontanée d'ingénieur qui ne semble pas considérer le factuel et le théorique comme deux ordres distincts. C'est un des traits caractéristiques de ce que l'épistémologue Anne-Françoise Schmid a analysé dans les théories fausses (Schmid, 1998, p. 63). Le fait que Pier Luigi Nervi adopte un critère utilitariste comme unique repère⁵² est également problématique d'un point de vue épistémologique puisqu'il apparaît comme un « obstacle pragmatique » (Bachelard, 1934/1967, Chapitre V).

Mais c'est la conclusion à laquelle arrive Pier Luigi Nervi qui mérite une attention particulière. Alors même qu'au départ sa recherche s'orientait vers ce qu'il qualifiait de :

« la perfetta padronanza delle leggi tecniche, *non umane o per lo meno non dipendenti dalla nostra volontà*, entro le quali è ineluttabilmente costretta la corretta realizzazione costruttiva. » (Nervi, 1945, p. 21-22 mes italiques)

Il considère finalement que la meilleure orientation pour la formation des architectes à la construction est de :

« riferirsi alle reali necessità dell'essercizio professionale e determinare la caratteristica degli studi, *non considerandogli come fatto scientifico a sè stante*, ma come efficiente preparazione e preciso orientamento mentale in vista delle effettive necessità dell'arte del costruire » (Nervi, 1945, p. 29 mes italiques).

Ici apparaît le début du divorce entre les lois qui intéressent Pier Luigi Nervi et les lois scientifiques. Les lois indépendantes de l'homme que Pier Luigi Nervi recherche ne sont pas indépendantes parce que dotées d'une objectivité scientifique, mais parce qu'elles s'accordent avec la réalité, qui est devenue entre-temps une réalité professionnelle. Cette réalité est un composé de multiples phénomènes qui peuvent chacun être étudiés indépendamment par des approches scientifiques. Mais l'entrelacement de ces phénomènes crée un décalage au vu duquel Pier Luigi Nervi érige la réalité empirique comme critère ultime. Il conclut son développement sur l'idée que les étudiants devraient être sensibilisés aux matériaux par un examen empirique de leur mode de résistance et de rupture et le recours à la passion et à l'intuition :

« In una parola avere creato spontanei e fecondi collegamenti tra il proprio spirito e le *divine* legge della natura » (Nervi, 1945, p. 31 mes italiques)

Quand il revient ici sur les « lois de la nature », c'est alors dans un tout autre sens que celui des lois scientifiques de la science des constructions. Les « lois de la nature » que Pier Luigi Nervi affectionne sont divines. Elles s'appréhendent non par la science, mais par la sensibilité, l'intuition et la passion. Ces lois semblent pour lui ne pas être accessibles à une rationalité scientifique et encore moins être mises en équation. Leur inaccessibilité à la raison leur donne un air ésotérique. Mais pour bien comprendre l'intention de Pier Luigi Nervi, il faut aussi tenir compte du fait qu'il ne cherche pas tant ici à élaborer une conception épistémologique des lois de la nature, mais plutôt à promouvoir l'utilisation de modèles physiques (des maquettes dotées de capteurs notamment). Il reste que, pour ce faire, il critique les approches mathématiques en mobilisant des conceptions épistémologiques

⁵² De manière symptomatique Pier Luigi Nervi semble avoir estimé que les lois de la physique n'étaient pas vraies tant qu'elles n'avaient pas servies à aller sur la lune et que c'est cet événement qui les confirme : « Anzi io mi meraviglio sempre che l'umanità filosofica e scientifica non abbia notato che quando il primo Sputnik è arrivato sulla luna, si è avuta la prima oggettiva e indiscutibile conferma che tutte le leggi fisiche finora espresse sono vere. » (Nervi et al., 1966, p. 23)

révélatrices. Néanmoins, il se dit de manière générale plutôt attaché aux sciences et à l'objectivité.

Cette analyse du rapport de Pier Luigi Nervi aux sciences et aux « lois de la nature » peut paraître longue, mais elle est importante pour éviter les malentendus quant à ses connaissances biologiques et au biomimétisme que l'on pourrait vouloir en inférer.

* * *

Il est notable que Pier Luigi Nervi ait eu connaissance — bien qu'il ne semble pas l'avoir cherché — de l'existence de recherches biologiques concernant le tissu trabéculaire des os et des diatomées. Mais les traces les plus anciennes attestant de sa prise de connaissance des diatomées sont postérieures aux projets du Palazzo dello sport et du Palazzetto dello sport que citent les discours biomimétiques. Aucune preuve n'a pu être trouvée indiquant qu'il en avait connaissance au moment d'élaborer ces projets. D'après la référence à Karl Cullmann citée dans son brevet on sait qu'il a eu une connaissance au moins sporadique de la biologie des os. On ne trouve pas de traces cependant d'un intérêt pour la connaissance de la biologie osseuse. Il ne semble pas qu'il ait eu connaissance des lois de Wolff par exemple⁵³. Il est important de remarquer que Pier Luigi Nervi approche les organismes naturels de manière non scientifique, mais par une pratique de métaphores et d'analogies basée sur la ressemblance. Les organismes naturels l'intéressent pour leur valeur statique, à égalité avec des artefacts techniques. Dans ce cadre, les êtres vivants ne semblent pas avoir été pour lui un objet d'intérêt en tant qu'ils sont vivants. La présence de termes renvoyant à l'univers de la biologie (vitalité, lois de la nature, organique...) peut ainsi être la source d'un malentendu si leur valeur métaphorique n'est pas analysée.

⁵³ Lois concernant la relation entre la formation des os et la direction des contraintes mécaniques auxquelles ils sont soumis. Pour la contribution de Julius Wolff à la notion d'isostaticité cf. p.12 de ce rapport.

VI. Retour sur les projets dits biomimétiques de Pier Luigi Nervi

À l'issue de cette enquête menée sur trois plans (celui des sources des allégations de biomimétisme, celui de la genèse des projets au sein de lignées de conception, celui des savoirs de Pier Luigi Nervi) et à partir d'un jeu de données limité, il est possible de juger un peu mieux du caractère biomimétique des projets de Pier Luigi Nervi.

Les os et leurs tissus spongieux, semblent être le modèle que Pier Luigi Nervi a le plus probablement pu utiliser dans sa conception architecturale. Il a au moins eu connaissance des observations de l'ingénieur Karl Culmann à ce sujet. Cependant c'est une connaissance mécanique appartenant à la physique qui semble l'intéresser, plus qu'une connaissance biologique traitant du vivant en tant que vivant. De plus, on peut faire remonter au plus tôt cette connaissance des os au brevet déposé le 23 juillet 1949. Or le travail de Pier Luigi Nervi sur les nervures isostatiques débord largement ce moment. D'une part, il est probable que la conception de la variante pour les dalles isostatiques de la manufacture de Bologne précède le brevet : le dessin final de la variante date du 11 juillet 1949, mais le concours remonte à 1948. D'autre part, il a élaboré au moins vingt projets comprenant des dalles à nervures isostatiques de types et de tailles très variables dont certains ont peu de liens avec les projets type du brevet. Les os ne sont pas, à notre connaissance, mentionnés dans la conception des dix-neuf autres projets. Enfin, il faut faire droit aux autres sources d'inspirations qui ont vraisemblablement nourri la conception des nervures isostatiques. Si les motifs indiens qu'Aldo Arcangeli a pu connaître sont une source d'inspiration probable, mais difficilement vérifiable, les architectures gothiques ont très certainement joué un rôle dans l'esprit de Pier Luigi Nervi. La variabilité des nervures isostatiques montre également l'importance d'autres éléments nourrissant la conception architecturale que ce soit des échelles parcellaires par lesquelles le site agit sur ces nervures, des échelles symboliques dans le cadre des édifices religieux, ou encore des échelles fonctionnelles qui déterminent les grandes portées de certains projets. On ne peut occulter que les projets d'architecture ne sauraient se nourrir que d'un modèle biologique, aussi intéressant soit celui de l'os.

Concernant les micro-algues que sont les diatomées ; Pier Luigi Nervi a eu connaissance des recherches du biologiste Johan-Gerhard Helmcke, et ces recherches l'ont intéressé au moins sur un mode visuel et analogique. Mais au plus loin que l'on puisse faire remonter la prise de connaissance de Pier Luigi Nervi des diatomées, elle reste postérieure à la conception des projets du Hall d'exposition de Turin, Palazzetto dello sport et du Palazzo dello sport de Rome. Rien n'indique qu'une diatomée ait été un modèle effectif des processus de conception de ces projets, ni que Pier Luigi Nervi n'ait connu les diatomées plus que par des photos.

Concernant, les feuilles de nénuphar géant, les radiolaires, et les autres pavots, arbres, bassins d'oiseau, l'enquête ne permet aucunement de corroborer le fait qu'ils aient été des modèles — encore moins des connaissances biologiques à leur sujet — mobilisés dans la conception de projets de Pier Luigi Nervi.

On doit donc attribuer un ensemble d'allégations de biomimétisme portées sur des projets de Pier Luigi Nervi à des analogies *a posteriori*. Le fait que Pier Luigi Nervi ait employé sur un mode métaphorique des termes pouvant être rapporté à la biologie a pu être une source de confusion. De même, la conception ambiguë dont peut faire preuve Pier Luigi Nervi des notions de « vivant » et de « lois de la nature » peut induire une lecture superficielle sur la piste d'un biomimétisme généralisé. Il n'en reste pas moins que Pier Luigi Nervi développait

une appréhension analogique du monde organique à partir d'un point de vue mécanique. Il a pu s'intéresser à différents organismes naturels principalement dans le but de développer et de transmettre des intuitions statiques. Mais de ce point de vue, les organismes naturels n'ont pas plus de valeur que des artefacts tels que des abat-jour ou des chapeaux. Faire dire aux architectures de Pier Luigi Nervi, ici étudiées, qu'elles procèdent d'une conception biomimétique est donc largement surfait. Mais contrairement aux preuves d'existence, la démonstration de non-existence ne saurait avoir de caractère décisif. Elle n'a le mérite que de n'avoir pas trouvé l'existence d'un fait dans l'exploration d'un corpus de données constitué pour être le plus pertinent possible étant donné les moyens matériels et temporels d'une recherche de ce type. D'autres données pourront toujours être exhibées et venir contredire ce constat.

Cette conclusion reste ainsi provisoire et pourrait être affinée. Je n'ai pu consulter qu'une partie du vaste fond disponible au Centro Archivi MAXXI, focalisé sur les projets et les dates correspondants aux discours biomimétiques. D'autres parties de ce fond pourraient révéler de nouvelles informations bien qu'elles risquent d'être, soit postérieures à la conception des projets, soit en lien avec d'autres projets. Il pourrait également être utile de mobiliser d'autres archives comme celui du CSAC (Centro Studi e Archivio della Comunicazione) de Parme, bien qu'il contienne principalement des dessins du Studio Nervi, et que la présence d'annotations soit donc nécessaire pour apporter de nouvelles informations.

Mais pour comprendre l'anachronisme de l'idée d'un biomimétisme chez Pier Luigi Nervi et pour rendre intelligibles les glissements et confusions dont son œuvre est l'objet, il reste un travail théorique à mener. Il semble nécessaire d'une part de repenser la notion d'inspiration en ce qu'elle repose sur des notions problématiques d'analogie et de ressemblance. D'autre part, il faudrait étudier le type d'éthique environnementale qu'était celle de Pier Luigi Nervi qui évoluait dans un contexte clairement moderniste. S'il est important pour cela d'étudier en quoi sa quête de performance et son désir de conquête de nouveaux horizons structurels sont incompatibles avec un certain développement durable, il est aussi intéressant de noter qu'ils ne sont pas si éloignés de la « performative morphology » développée aujourd'hui par l'architecte Achim Mengès. Enfin, il faudrait poser un regard critique sur la supposée anhistoricité des « lois de la nature » dont Pier Luigi Nervi se revendique. Dans cette perspective, il serait pertinent de voir comment le contexte formateur de son travail, notamment celui de l'autarcie italienne qui a suivi les sanctions économiques de la Société des Nations en 1935, a conditionné un rapport à la rareté des ressources et des matériaux qui a une historicité propre. La question des lois de la nature appliquées aux sciences biologiques pourrait également être étudiée pour elle-même, avant toute volonté utilitariste puisque la notion de lois ne jouit pas dans toutes les sciences du même statut qu'en physique.

Annexe 1 : photos de diatomées envoyées à Pier Luigi Nervi

n°1 *Actinocyclus ehrenberaii* (F16216) [vol.1]

n°2 *Actinocyclus ehrenberaii* (F16195) [vol.1]

n°3 *Actinocyclus ehrenberaii* (F16206) [vol.4]

n°4 *Asteromphalus hookeri* (F16200) [vol.2]

n°5 *Arachnoidiscus ornatus* (F16212) [vol.3]

n°6 *Actinoptychus undulatus* (F16204) [vol.3]

n°7 *Actinoptychus undulatus* (F16214) [vol.3]

n°8 *Actinoptychus splendens* (F16202) [vol.3]

n°9 *Biddulphia aurita* (F16201) [vol.4]

n°10 *Biddulphia polymorpha* (F16213) [vol.2]

n°11 *Chaetoceras borealis* (F16215) [vol.2]

n°12 *Chaetoceras Lorenzianus* (F16205) [vol.2]

n°13 *Cyclotella meneghiniana* (F16191) [vol.3]

n°14 *Cocconeis disculus* (F16198) [vol.3]

n°15 *Cyclotella meneghiniana* (F16193) [vol.3]

n°16 *Gyrosigma acuminatum* (F16209) [vol.2]

n°17 *Melosira nummuloides* (F16203) [vol.2]

n°18 *Navicula pavillarii* (F16196) [vol.4]

n°19 *Nitzschia dissipata* (F16199) [vol.1]

n°20 *Nitzschia dissipata* (F16210) [vol.1]

n°21 *Triceratium alternans* (F16192) [vol.3]

n°22 *Triceratium alternans* (F16207) [vol.3]

n°23 *Skeletonema costatum* (F16211) [vol.1]

n°24 *Skeletonema costatum* (F16217) [vol.1]

n°25 *Skeletonema costatum* (F16208) [vol.1]

n°26 *Suirella gemma* (F16194) [vol.1]

Annexe 1 — n°1 à 27 diatomées
(photos de Johan-Gerhard Helmcke du
Forschungsgruppe für Mikromorphologie, conservées
au Centro Archivi MAXXI, R7/6)

(entre parenthèses le numéro d'inventaire du Centro
Archivi Maxxi)

n°27 *Stephanodiscus astraea* (F16197) [vol.4]

[entre crochets le volume du *Diatomeenschalen im
elektronenmikroskopischen Bild* dans lequel la photo
est également publiée]

Photos non publiables en ligne, contacter l'auteur pour plus de précisions.

Bibliographie

- Abram, J. (2010). Pier Luigi Nervi. La résistance par la forme, la forme comme structure. In C. Olmo (Éd.), *Pier Luigi Nervi, l'architecture comme défi* (p. 41-57). Silvana Editoriale.
- Abram, J. (2018). Pier Luigi Nervi. Une plastique de la pensée. In *Aesthetics and Technology in Building. Pier Luigi Nervi The Twenty-First Century Edition* (2ème édition, p. 209-229). University of Illinois Press.
- Antinarelli, M., & Tito Colombo, A. (Éds.). (2011). *Pier Luigi Nervi: L'architettura molecolare*. Grafiche Aurora.
- Arnheim, R. (1986). *Dynamique de la forme architecturale* (M. Schoffeniels-Jeunehomme & G. Van Cauwenberge, Trad.). Mardaga. (Original work published 1977)
- Bachelard, G. (1967). *La formation de l'esprit scientifique. Contribution à une psychanalyse de la connaissance objective*. Vrin. (Original work published 1934)
- Baldissara, M. (2018). *Biomimetica degli spazi: Sperimentazioni digitali di processi biologici in architettura* [La Sapienza, Facoltà di architettura, Antonino Saggio dr.]. <http://www.arc1.uniroma1.it/dottorato/composizione/architettonica/Dissertazioni/30BaldissaraMatteoBiomimeticaDegliSpazi.pdf>
- Bellucci, G. (2011). Sodalizio scandinavo—Pier Luigi Nervi e Gio Ponti: Storia di una collaborazione pluriennale tra Italia e Svezia. In M. Antinarelli & A. T. Colombo (Éds.), *Pier Luigi Nervi: L'architettura molecolare* (p. 31-43). Grafiche Aurora.
- Benyus, J. (2002). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Harper Collins Publishers. (Original work published 1997)
- Bologna, A. (2013). *Pier Luigi Nervi negli Stati Uniti. 1952-1979*. Firenze University Press.
- Boudon, P., Deshayes, P., Pousin, F., & Schatz, F. (2000). *Enseigner la conception architecturale. Cours d'architecturologie*. Editions de La Villette. (Original work published 1994)

- Buda, C. Z. (Éd.). (2016). *L'archivio Pier Luigi Nervi nelle collezioni del MAXXI Architettura*. Fondazione MAXXI.
- Canguilhem, G. (1992). La théorie cellulaire. In *La connaissance de la vie* (p. 53-102). Vrin.
- Castelli, F. R. (2011). « beauty is truth, truth is beauty ». Ragioni e intenzioni di questo volume. In F. R. Castelli & A. I. Del Monaco (Éds.), *Pier Luigi Nervi e l'architettura strutturale* (p. 15-22). EdilStampa.
- Castelli, F. R., & Del Monaco, A. I. (Éds.). (2011). *Pier Luigi Nervi e l'architettura strutturale*. EdilStampa.
- Chayaamor-Heil, N., & Vitalis, L. (2021). Biology and architecture : An ongoing hybridization of scientific knowledge and design practice by six architectural offices in France. *Frontiers of Architectural Research*, 10(2), 240-262. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2020.10.002>
- Coineau, Y., & Kresling, B. (1897). *Les inventions de la nature et la bionique*. Muséum d'Histoire Naturelle - Hachette.
- Culmann, K. (1880). *Traité de statique graphique*. Dunod.
- Desideri, M. (2011). Contributo al Convegno di studio su Pier Luigi Nervi—Roma 12 Novembre 1999—Seconda sessione. Il progetto e il cantiere. In F. R. Castelli & A. I. Del Monaco (Éds.), *Pier Luigi Nervi e l'architettura strutturale* (p. 122-139). EdilStampa.
- Einaudi, R. (2010). Pier Luigi Nervi: Lezione romane, Lecture Notes, 1959-1960. In A. Trentin & T. Trombetti (Éds.), *La Lezione di Pier Luigi Nervi* (p. 63-159). Bruno Mondadori.
- Gargiani, R., & Bologna, A. (2016). *The rhetoric of Pier Luigi Nervi: Concrete and ferrocement forms*. EPFL Press.
- Greco, C. (2008). *Pier Luigi Nervi: Dai primi brevetti al Palazzo delle Esposizioni di Torino 1917-1948*. Quart Edizioni.
- Gruber, P. (2011). *Biomimetics in Architecture : Architecture of Life and Buildings*. Springer.

- Guchet, X. (2008). Évolution technique et objectivité technique chez Leroi-Gourhan et Simondon. *Appareil*, 2. <https://doi.org/10.4000/appareil.580>
- Halpern, A. B., Billington, D. P., & Adriaenssens, S. M. (2013). The ribbed floor slab systems of pier luigi nervi. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 54(176-177), 127-136.
- Helmcke, J.-G., & Krieger, W. (Éds.). (1953). *Diatomeenschalen im elektronenmikroskopischen Bild (vol.1)*. Cramer.
- Hermant, A. (1959). *Formes utiles*. Editions du salon des Arts Ménagers.
- Howard, S. (1961). A new look at flat plate construction. *Architectural Record*, 193-197.
- Huxtable, A. L. (1960). *Pier Luigi Nervi*. George Braziller.
- Iori, T. (2009). Pier Luigi Nervi, Annibale Vitellozzi Palazzetto dello Sport a Roma ; un prototipo ripetibile e a buon mercato. *Casabella*, 782, 50-65.
- Iori, T. (2012). Le plancher à nervures isostatiques de Nervi. In R. Gargiani, *L'architrave le plancher la plate-forme. Nouvelle histoire de la construction* (p. 755-760). esser Polytechniques et universitaires romandes.
- Jain, P. (2020). *Biomimicry and contemporary parametricism* [Shri Gijubhai Chhaganbhai Patel Institute of Architecture, Interior Design & Fine Arts of Veer Narmad South Gujarat University]. https://issuu.com/priyeshjain8/docs/final_research_report
- Kozlov, D. (2019). *The Heritage of the Laboratory of Architectural Bionics and the Latest Trends in Architectural Morphogenesis*. 366-371. <https://doi.org/10.2991/ahti-19.2019.68>
- Lebedew, J. S. (1983). *Architektur und Bionik*. VEB Verlag für Bauwesen. (Original work published 1977)
- Leslie, T. (2003). Form as Diagram of Forces. The Equiangular Spiral in the Work of Pier Luigi Nervi. *Journal of Architectural Education*, 57(2), 45-54. <https://doi.org/10.1162/104648803770558987>
- Mazzoleni, I. (2013). *Architecture Follows Nature-Biomimetic Principles for Innovative Design*. CRC Press.

- Moretti, L. (1950). Un progetto di Pier Luigi Nervi per un'aviorimessa a Buenos Aires. *Spazio*, 1, 50-51.
- Nachtigall, W. (2003). *Bau-Bionik : Natur—Analogien—Technik*. Springer-Verlag.
- Neri, G. (2014). *Capolavori in miniatura : Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*. Mendrisio Academy Press ; Silvana Editoriale.
- Nervi, P. L. (1939). La tecnica ed i nuovi orientamenti estetici. In *Atti del convegno di ingegneria dell'anno XVIII*. Sindacato fascista ingegneri di Milano.
- Nervi, P. L. (1945). *Scienza o arte del costruire? Caratteristiche e possibilità del cemento armato*. Edizioni della bussola.
- Nervi, P. L. (1950). Ancora sul « senso dell'architettura ». *Domus*, 244, iii-vi.
- Nervi, P. L. (1957). Soluzione tecnico costruttiva della copertura per la chiesa dell'architetto Vaccaro a Borgo Panigale. *Quaderni di chiesa e quartiere*, 4, 32-35.
- Nervi, P. L. (1963a). *New Structures*. The Architectural Press.
- Nervi, P. L. (1963b). Some Consideration About Structural Architecture. *The Student Publications of the School of Design - North Carolina College Raleigh, N.C.*, 11(2), 41-47.
- Nervi, P. L. (1965a). *Aesthetics and Technology in Building*. Harvard University Press.
- Nervi, P. L. (1965b). Chiesa per il quartiere ANIC di Ravenna. *Fede e arte*, XIII(2), 165-171.
- Nervi, P. L. (1965c). Is architecture moving toward unchangeable forms? In G. Kepes, *Structures in art and science* (p. 96-104). George Braziller.
- Nervi, P. L. (1997). *Savoir construire* (M. Gallot, Trad.). Éditions du linteau. (Original work published 1955)
- Nervi, P. L., de Finetti, B., Dorfles, G., & d'Arcais, F. (1966). Forme estetiche e leggi fisiche. *Civiltà delle macchine*, 3, 19-30.
- Oliveira, C., Steffen, L., Vasconcellos, C., & Sanchez, P. (2019). Structural topology optimization as a teaching tool in the Architecture. *Revista de Ensino de Engenharia*, 37(3). <https://doi.org/10.5935/2236-0158.20180039>
- Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in Architecture*. RIBA Publishing.

- Pohl, G., & Nachtigall, W. (2015). *Biomimetics for architecture & design : Nature, analogies, technology*. Springer.
- Portoghesi, P. (1999). *Natura e architettura*. Skira.
- Portoghesi, P., Marconi, P., & Barbera, L. (2011). Intervista a Paolo Portoghesi e Paolo Marconi (marzo 2010). In F. R. Castelli & A. I. Del Monaco (Éds.), *Pier Luigi Nervi e l'architettura strutturale* (p. 184-187). EdilStampa.
- Ronchi, L. (1956). Concorso Nazionale per l'allargamento di ponte Garibaldi a Roma. *L'Architettura cronache e storia*, 6, 850-852.
- Salvia, G., Rognoli, V., & Levi, M. (2009). *Il Progetto della Natura. Gli strumenti della biomimesi per il design*. FrancoAngeli.
- Schmid, A.-F. (1998). *L'âge de l'épistémologie. Science, ingénierie, éthique*. Kimé.
- Seidler, H. (s. d.). *MLC Centre | Harry Seidler & Associates*. Consulté 4 septembre 2021, à l'adresse <https://seidler.net.au/index.php?id=20>
- Seilacher, A. (1979). Constructional Morphology of Sand Dollars. *Paleobiology*, 5(3), 191-221. JSTOR.
- Stals, A. (2014). *Nature et architecture : De la morphogenèse du vivant à la création numérique* [Université de Liège, Liège, Belgique]. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/188044>
- Sydney ribs. (1977). *The Architectural Review*, 161, 145-146.
- Thompson, D. W. (2014). *On Growth and Form*. Dover. (Original work published 1917–1942)
- Trentin, A. (2010). Metodo scientifico e invenzione: Una pratica per il progetto contemporaneo? Appunti attorno al pensiero di Pier Luigi Nervi. In A. Trentin & T. Trombetti (Éds.), *La Lezione di Pier Luigi Nervi* (p. 169-183). Bruno Mondadori.
- Trentin, A., & Trombetti, T. (Éds.). (2010). *La Lezione di Pier Luigi Nervi*. Bruno Mondadori.
- von Meyer, G. H. (1867). Die Architectur der Spongiosa. *Reichert und Du Bois-Reymond's Archiv*, 8, 615-628.

Wolff, J. (1870). Ueber die innere Architectur der Knochen und ihre Bedeutung für die Frage vom Knochenwachsthum. *Archiv für pathologische Anatomie und Physiologie und für klinische Medicin*, 50(3), 389-450. <https://doi.org/10.1007/BF01944490>