



Le système hydraulique gravitaire de la Villa d'Este : ingénierie et patrimoine technique

Marc Mauduit

La Villa d'Este de Tivoli (Italie), édifée à partir de 1550-1560 pour le cardinal Ippolito II d'Este, représente un chef-d'œuvre d'ingénierie hydraulique de la Renaissance. Son réseau d'eau s'inspire des techniques romaines antiques de captation et d'adduction, étudiées par l'architecte Pirro Ligorio et ses collaborateurs. Deux canaux de dérivation furent aménagés pour détourner partiellement les eaux de l'Aniene vers le site de la villa : un premier canal dès 1560, alimentant un grand réservoir sous l'ancien monastère (future cour de la villa), et un second canal en 1564, d'environ 300 m de long, creusé sous Tivoli jusqu'aux chutes de l'Aniene, afin d'augmenter le débit disponible. La source du *Rivellese* fut également captée à l'origine pour remplir la citerne initiale sous la cour.

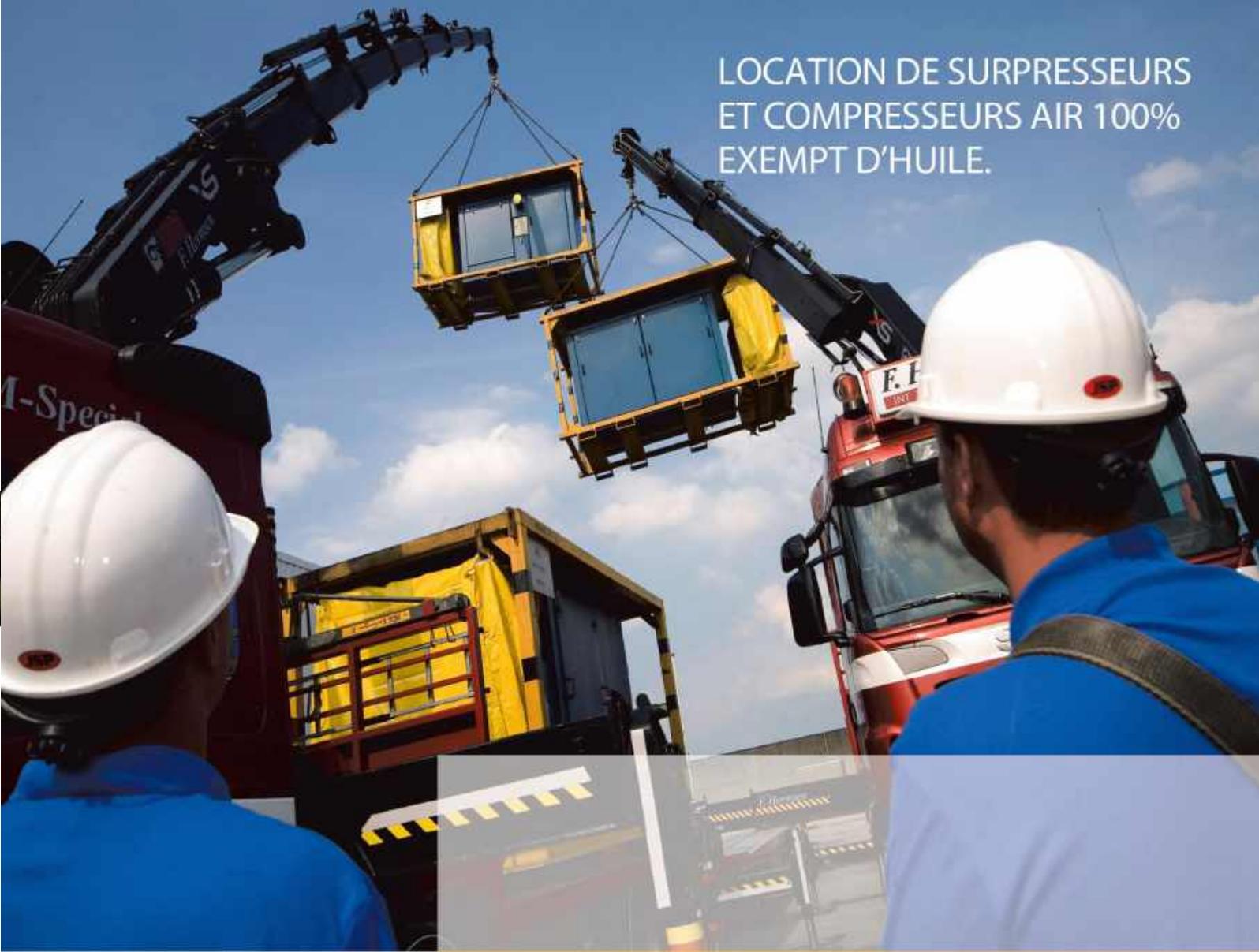
Cette infrastructure stockait l'eau dans des *castella* (chambres de mise en charge) en hauteur, puis la distribuait

gravitairement à l'ensemble des fontaines et jeux d'eau du jardin. Le dénivelé naturel du terrain, de plus de 45 m entre la villa en haut et le bas du jardin, fut exploité pour créer la pression nécessaire. Depuis le grand réservoir supérieur (notamment celui dissimulé dans le « château d'eau » de la fontaine de l'Orgue ou *Fontana dell'Organo*), un réseau de conduits et de canalisations - plusieurs centaines de mètres de conduites (quasiment 875 m au total), selon les relevés partiels conservés - achemine l'eau par gravité vers 51 fontaines et nymphées, alimentant 398 goulots, 364 jets d'eau, 64 cascades et 220 bassins. L'intégralité du système fonctionne sans aucune pompe ni mécanisme motorisé : seul le principe des vases communicants et la pression hydrostatique engendrée par la hauteur d'eau mettent en mouvement les eaux jaillissantes. Des canaux souterrains (environ 200 m sous l'artifice de la fontaine de l'Ovale) furent aménagés

pour répartir l'eau jusqu'aux points les plus éloignés du jardin.

Le débit est finement contrôlé par des vannes et orifices calibrés. À la prise d'eau sur l'Aniene, un canal de dérivation muni de vannes permet de réguler le volume acheminé vers la villa pour éviter tout engorgement ou pénurie. Ensuite, chaque grand ouvrage hydraulique dispose de son propre bassin de mise en charge servant de répartiteur. Par exemple, le grand *castellum aquae* dissimulé derrière la fontaine de l'Orgue alimente en cascade plusieurs fontaines majeures, et la fontaine de l'Ovale, dotée d'une « montagne artificielle » jouant le rôle de réservoir naturel, distribue l'eau vers les fontaines en contrebas. Ce réseau hiérarchisé assure une pression suffisante pour propulser des jets d'eau spectaculaires, tout en maintenant des débits maîtrisés pour chaque fontaine. Le fonctionnement repose exclusivement

LOCATION DE SURPRESSEURS
ET COMPRESSEURS AIR 100%
EXEMPT D'HUILE.



AERZEN

RENTAL



24/7 SERVICE ET SUPPORT

01 46 74 13 17

Un problème sur la source d'air
de votre process?

Nous vous livrons la solution
en urgence!

Location d'une source en
AIR 100% exempt d'huile (ISO class 0).

A vos côtés 24h/24 7j/7

Centre de location France
Numéro unique 06 08 98 68 38
cedric.borsani@aerzenrental.com



www.aerzenrental.com



Vue de la fontaine des Dragons au centre du jardin, avec son puissant jet d'eau vertical et les quatre dragons sculptés crachant de l'eau.

sur la gravité, avec une gestion fine des débits et des pressions réparties par niveaux.

La conception technique fut menée par une équipe d'experts: le cardinal d'Este confia la planification du jardin à Pirro Ligorio, architecte et antiquaire qui étudia en détail les aqueducs romains. Pour l'hydraulique, Ligorio fut secondé par Tommaso Chiruchi de Bologne, réputé comme l'un des plus éminents ingénieurs hydrauliques du XVI^e siècle (il avait œuvré aux fontaines de la Villa Lante). Chiruchi apporta son savoir-faire en dimensionnement des conduites, en gestion des pressions et en organisation du chantier hydraulique. Par ailleurs, Claude Venard, artisan français spécialisé dans les orgues hydrauliques, participa à la conception des dispositifs les plus innovants, dont l'orgue à eau lui-même. Les sources historiques mentionnent également l'intervention du fontainier Luc Leclerc (l'oncle de Venard), qui aurait commencé la fontaine de l'Orgue dès 1547 et contribué aux autres fontaines majeures. L'implication de ces techniciens, alliant expertise italienne et française, a permis de réaliser en moins de deux décennies (les travaux s'achevant vers 1572) un système hydraulique intégré d'une complexité inédite. La construction mobilisa d'importants moyens: détournement partiel de l'Aniene par des travaux de terrassement considérables (les archives indiquent l'excavation de vastes volumes de terre et la démolition de bâtiments pour créer les terrasses), pose de conduits en plomb et

en terre cuite sur des kilomètres cumulés, et édification de réservoirs camouflés dans le paysage (grottes, rochers artificiels). Malgré les litiges avec les habitants de Tivoli concernant l'usage de l'eau et les expropriations, le projet avancé par Ligorio et ses fontainiers aboutit à un jardin aquatique sans équivalent à l'époque, où chaque source, canal et jet d'eau s'insère dans une composition symétrique maniériste. L'ingéniosité du réseau – purement gravitaire et, pourtant, modulable – témoignait d'une maîtrise technique remarquable de leurs contemporains.

DISPOSITIFS EMBLÉMATIQUES: FONTAINES ET MÉCANISMES HYDRAULIQUES REMARQUABLES

L'orgue hydraulique: prouesse mécanique et restauration contemporaine

La fontaine de l'Orgue est sans doute le dispositif le plus emblématique du jardin, combinant art hydraulique et musical. Inaugurée vers 1571, elle abrite un véritable orgue joué par la force de l'eau, conçu par Claude Venard en s'inspirant des traités antiques d'Héron d'Alexandrie et de Vitruve sur les orgues hydrauliques. Le mécanisme, dissimulé dans le *castellum aquae* derrière la façade architecturale, utilise l'eau pour produire de l'air comprimé et actionner automatiquement un clavier d'orgue. Concrètement, l'eau amenée au sommet du réservoir est d'abord dirigée vers

une série de siphons et de tourbillons qui emprisonnent de l'air dans le flux. Le mélange eau-air chute ensuite dans une chambre dite *aeolia* (chambre des vents) où l'air est séparé et accumulé sous pression, tandis que l'eau entraîne une roue à aubes couplée à un cylindre à chevilles. Ce cylindre, en tournant, ouvre successivement des valves alimentant 22 tuyaux d'orgue (selon la conception initiale) de longueurs variées, produisant ainsi une mélodie prédéterminée. Le mécanisme offrait une séquence sonore et visuelle d'environ deux à trois minutes, articulée autour d'un signal d'appel, d'une mélodie et d'un effet final spectaculaire: elle débutait par le son de deux trompettes automatiques logées en façade (actionnées par l'air comprimé) pour attirer l'attention. Puis venait la pièce musicale principale – probablement un madrigal polyphonique à 4 ou 5 voix – jouée par les tuyaux de l'orgue alimentés en air. Enfin, en point d'orgue, survenait « le Déluge »: une cascade soudaine jaillissant du sommet de la fontaine et des jets d'eau surgissant violemment autour, accompagnés du son tonitruant d'un cor porté par un triton sculpté. L'ensemble imitait le tonnerre et émerveillait les spectateurs par l'union de l'eau, de la musique et du mouvement. Ce théâtre d'eau impressionna jusqu'au pape Grégoire XIII lui-même, qui, lors de sa visite en 1572, fit arrêter le mécanisme pour inspecter l'intérieur, incrédule qu'aucun musicien ne soit caché dans la fontaine.

Le dispositif original, très délicat, nécessitait un entretien constant: dépôts calcaires, débris et usure pouvaient facilement bloquer les soupapes ou fausser les sons. Des restaurations furent entreprises dès le XVII^e siècle (sous le cardinal Alessandro d'Este notamment, qui fit refaire l'orgue en lui ajoutant un clavier manuel étendu et de nouvelles statues décoratives). Cependant, au XVIII^e siècle, l'orgue hydraulique cessa définitivement de fonctionner, son mécanisme étant irréparable avec les moyens de l'époque. Ce n'est qu'au XXI^e siècle qu'il a retrouvé sa voix: en 2003, après une restauration longue et minutieuse, l'orgue hydraulique a été remis en service. Les restaurateurs ont conservé la chambre à vent et le réservoir tourbillonnaire d'origine, tout en reconstruisant le reste de la machinerie en matériaux modernes (inox, laiton) sur le modèle

d'époque. L'orgue restauré comporte désormais 144 tuyaux et est actionné par un cylindre programmable, mu par l'eau, pouvant jouer quatre pièces de musique Renaissance pour une durée totale d'environ quatre minutes. Cette renaissance technique, fidèle aux principes du XVI^e siècle, permet aux visiteurs actuels d'entendre chaque jour la musique d'eau qui avait fait la renommée de la Villa d'Este.

La fontaine des Dragons : jets verticaux et effets sonores dynamiques

Située au centre géométrique du jardin, la fontaine des Dragons (*Fontana dei Draghi*) illustre l'emploi spectaculaire de la pression gravitaire pour animer l'eau et même produire du son. Conçue par Pirro Ligorio, elle fut achevée précipitamment en 1572 à l'occasion de la venue du pape Grégoire XIII – dont le blason portait un dragon, d'où le thème choisi. La fontaine se compose d'un grand bassin ovale ceint de rampes en hémicycle, au milieu duquel émerge un rocher orné de quatre dragons ailés sculptés. Ces dragons crachent des jets d'eau puissants vers le centre, tandis qu'au cœur du dispositif s'élance un jet d'eau vertical monumental, formant une haute colonne d'eau visible de tout le jardin. L'introduction d'un jet vertical de grande hauteur comme pièce maîtresse était alors novatrice ; ce concept fut d'ailleurs repris dans de nombreux jardins baroques ultérieurs en Europe. Autour des dragons, Ligorio avait enrichi la scène de multiples effets : deux dauphins sculptés projettent des arcs d'eau latéralement, et des canaux déversent de l'eau le long des balustrades en passant par des figures grotesques (sphinx-femmes, grenouilles, salamandres) qui recrachent l'eau à différents niveaux. Le résultat est un véritable théâtre aquatique en mouvement. Plus remarquable encore, la fontaine des Dragons était équipée d'un mécanisme hydro-acoustique destiné à imiter des détonations sonores. En fermant temporairement certaines conduites puis en les ouvrant brusquement, l'eau sous pression était libérée d'un coup, provoquant un bruit sec et puissant comparable à des coups de canon ou des feux d'artifice. Les chroniques indiquent qu'en modulant le débit – passant d'un fin brouillard à un torrent soudain depuis les conduits supérieurs – les fontainiers parvenaient à créer des grondements pour accentuer l'aspect dramatique de

la scène. À l'époque d'Ippolito d'Este, ces effets sonores hydrauliques surprenaient les visiteurs et contribuaient à la narration mythologique du lieu : ces effets visaient à évoquer des épisodes mythologiques, comme la foudre de Jupiter (une statue de Jupiter brandissant des foudres fut plus tard placée dans une niche pour symboliser cela) ou les rugissements symboliques du dragon Ladon vaincu par Hercule dans la légende représentée. Techniquement, cette fontaine mettait à l'épreuve la robustesse des conduites et du réservoir supérieur, en exigeant une mise en pression contrôlée de l'eau. La capacité à produire un jet central de grande hauteur sans pompe démontre la hauteur de chute disponible et l'étanchéité du réseau. Pour atteindre une hauteur de 30 à 40 mètres, le système nécessitait une pression minimale de 4 bar, générée par la hauteur de chute disponible (dénivelé d'environ 40 m), à laquelle il faut ajouter les pertes de charge dans les conduites. La fontaine des Dragons est ainsi un exemple abouti de la synergie entre architecture, sculpture et performance hydraulique, exploitant pleinement l'énergie gravitaire de l'eau pour allier visuel et auditif.

L'allée des Cent Fontaines : une cascade linéaire à trois niveaux

L'allée des Cent Fontaines (*Viale delle Cento Fontane*) se présente comme une longue perspective traversant le jardin sur toute sa largeur, reliant la fontaine de l'Ovale à l'est à la fontaine de Rometta («petite Rome») à l'ouest. Sur environ 100 m de longueur, cette allée est bordée d'une multitude de petites fontaines disposées sur

trois niveaux superposés tout le long du mur. Chaque niveau est un étroit canal rectiligne orné de mascarons cracheurs ou de motifs sculptés (obélisques, aigles héraldiques, lys de France, petits bateaux, etc.) qui laissent jaillir l'eau en éventail. Le niveau supérieur alimente en continu, par débordement, le canal du niveau intermédiaire, qui lui-même cascade vers le canal inférieur, réalisant une distribution en cascade d'un bout à l'autre de l'allée. On estime qu'au total, plus de 300 jets d'eau s'égrènent ainsi en une succession rythmée, formant un murmure d'eau continu accompagnant la promenade.

Conçue par Ligorio autour de 1565-1570, cette allée-cascade servait d'épine dorsale transversale du jardin, permettant d'admirer en enfilade la mise en scène hydraulique depuis différents points de vue. Techniquement, son alimentation provient de la fontaine de l'Ovale en amont : un trop-plein dirigé vers l'allée assure un débit constant, réparti équitablement sur la centaine d'orifices par un calibrage soigné des goulots. Chaque petite gargouille crache un filet d'eau qui retombe dans le canal en dessous, le tout créant un effet visuel étagé et un clapotis harmonieux. Ce dispositif illustre la capacité des ingénieurs à étaler un même flux d'eau sur une longue distance en conservant une dynamique esthétique : la perte de charge progressive est compensée par la pente douce du canal et la subdivision du flux, de sorte qu'à l'extrémité de l'allée, l'eau s'écoule encore suffisamment pour alimenter les fontaines suivantes (notamment la Rometta). L'allée des Cent



Fontaines marie ainsi fonction utilitaire (le transfert de l'eau en travers du site) et scénographie poétique. Elle fut largement célébrée dans la littérature et l'art (par exemple dans les *Élégies romaines* de Gabriele d'Annunzio) et reste une des signatures du jardin.

MAINTENANCE ET RESTAURATION : PRÉSERVER LE FONCTIONNEMENT HISTORIQUE

Malgré son ingéniosité, le système hydraulique de la Villa d'Este a toujours nécessité une maintenance vigilante pour conserver ses performances. Dès la fin du XVI^e siècle, le cardinal Luigi d'Este et ses successeurs durent investir pour réparer fuites, obstructions et dégradations liées au temps. Les conduites en plomb, par exemple, étaient sujettes à l'entartrage et à la corrosion; certaines furent volées ou endommagées lors des vicissitudes historiques (pendant les occupations militaires du début du XIX^e siècle, les troupes françaises ont même retiré des éléments métalliques des fontaines). Cependant, l'essentiel du réseau originel a survécu et fonctionne encore, après des réparations successives effectuées en respectant le tracé et les matériaux d'époque lorsque cela était possible.

Aux XIX^e et XX^e siècles, plusieurs campagnes de restauration ont redonné vie aux jardins tombés un temps à l'abandon. Le cardinal Gustav von Hohenlohe (propriétaire dans la seconde moitié du XIX^e) remit en eau un grand nombre de fontaines en 1850-1890 en débroussaillant les conduits et en réapprovisionnant la villa en eau. Après la nationalisation du site en 1920, l'État italien entreprit dès 1922 des travaux méthodiques : consolidation des structures, nettoyage des bassins, restitution de certaines sculptures manquantes, et restauration des *giochi d'acqua* (jeux d'eau surprises) pour les remettre en service. Durant les années 1980-2000, un programme spécifique a visé les fontaines elles-mêmes : les techniques d'entretien traditionnelles (curage manuel des canalisations, démontage et nettoyage des vannes, retrait des algues et dépôts calcaires) ont été combinées aux apports scientifiques modernes (analyses de l'eau, traitements anti-calcaire discrets)



La perspective de l'allée des Cent Fontaines est constituée par un canal en terrasse ponctué de centaines de jets d'eau en cascades successives sur trois niveaux.

afin de prolonger la vie du réseau sans le dénaturer.

Un enjeu majeur a été la qualité de l'eau de l'Aniene, qui s'était dégradée au fil du XX^e siècle. En 1998, la mise en service d'une station d'épuration en amont a permis d'alimenter les fontaines avec une eau à nouveau claire et non corrosive, conditions indispensables pour poursuivre les restaurations entamées dans les années 1980. Ainsi, de 1998 à 2002, de nombreux ouvrages ont retrouvé leur lustre : par exemple, la fontaine de la Chouette (*Fontana della Civetta*), autre mécanisme musical du jardin, a été restaurée en 2001 en reconstituant son automate à oiseaux chanteurs d'après des fragments d'origine découverts sous les dépôts calcaires. De même, la fontaine de l'Orgue a fait l'objet d'un chantier exemplaire (1995-2003) mobilisant hydrauliciens, facteurs d'orgues et historiens : ils ont recréé les pièces manquantes en suivant les descriptions anciennes, évitant l'ajout de motorisation électrique et conservant ainsi le mode de fonctionnement gravitaire authentique. Les marbres et mosaïques décoratifs ont été nettoyés et consolidés, et les sculptures (dragons, aigles, déesses) restituées ou repositionnées conformément aux documents d'archives.

Chaque intervention a cherché à respecter le système historique : aucune pompe moderne n'a été installée, on a préféré augmenter la section de certaines canalisations d'origine ou ajouter

des trop-pleins discrets pour fiabiliser l'alimentation. Les quelques ajouts techniques nécessaires (vannes de régulation contemporaines, filtres anti-particules) sont camouflés dans les ouvrages pour ne pas altérer l'aspect visuel et pour pouvoir être retirés sans dommage. Cette philosophie de conservation, en accord avec la Charte de Venise, maintient la Villa d'Este en fonctionnement vivant. Aujourd'hui, environ la moitié des fontaines, grottes et nymphées jouent parfaitement, tandis que d'autres continuent d'être restaurées progressivement. L'entretien courant est assuré par des fontainiers spécialisés qui veillent quotidiennement au débit et à la pression dans chaque branche du réseau, ajustant les vannes selon la saison et nettoyant régulièrement les ouvrages pour éviter l'encrassement. Grâce à ces efforts, le visiteur moderne peut admirer un circuit d'eau qui, plus de 450 ans après sa création, fonctionne toujours essentiellement comme à l'origine, témoignant de la robustesse et de la pertinence des techniques hydrauliques de la Renaissance.

HÉRITAGE ET INSPIRATION CONTEMPORAINE D'UNE GESTION DURABLE DE L'EAU

Le système hydraulique de la Villa d'Este a eu une influence profonde sur l'art des jardins et l'ingénierie des fontaines dans toute l'Europe. Dès le XVII^e siècle, des réalisations prestigieuses comme les jardins de Versailles en France se sont

inspirées de ses principes – même si, faute de source gravitaire suffisante, Versailles dut recourir à des machines élévatoires coûteuses. La Villa d'Este demeure ainsi un paradigme de gestion gravitaire de l'eau : elle démontre qu'avec une conception judicieuse (captage en altitude, réservoirs bien placés, réseau dimensionné pour les pertes de charge), il est possible d'alimenter des centaines de jets et cascades uniquement par la pression naturelle. Cette leçon est particulièrement pertinente aujourd'hui, à l'heure de la recherche de la durabilité et de l'efficacité énergétique. Alimenter un vaste ensemble hydraulique sans pompe signifie zéro dépense énergétique en fonctionnement et un système silencieux et résilient – autant de qualités recherchées dans les infrastructures modernes de distribution d'eau. Les ingénieurs actuels reconnaissent la Villa d'Este comme un exemple historique de gestion durable de l'eau par gravité, où l'intégration au

paysage et la faible empreinte énergétique allaient de pair.

Par ailleurs, l'aspect esthétique et ludique du réseau d'Este a inspiré d'innombrables fontaines contemporaines. Des parcs publics, des hôtels et même des installations d'art hydraulique high-tech citent la Villa d'Este en modèle. Par exemple, les concepteurs du célèbre Bellagio à Las Vegas (États-Unis) ont puisé dans la tradition des « eaux dansantes » de la Renaissance italienne. Si les fontaines modernes utilisent désormais électronique et pompes, l'idée d'une orchestration globale de l'eau dans l'espace trouve son origine à Tivoli. Sur le plan patrimonial, la Villa d'Este est inscrite à l'UNESCO depuis 2001, en grande partie pour l'exceptionnelle conservation de son système d'eau original et l'innovation qu'il représentait à son époque. Les experts soulignent « l'ingéniosité créative avec laquelle les fontaines et bassins utilisent

l'eau – caractéristique inégalée en Europe à la Renaissance ».

En somme, le système hydraulique de la Villa d'Este est bien plus qu'une curiosité historique : c'est un cas d'école qui prouve la fiabilité des techniques gravitaires, l'importance d'une maintenance adaptée aux matériaux d'origine et la capacité des infrastructures anciennes à durer si elles sont bien conçues. Son héritage perdure dans les méthodes contemporaines de gestion de l'eau, qui privilégient la gravité (châteaux d'eau, réseaux à écoulement libre, etc.). Plus de quatre siècles après sa création, la conception hydraulique gravitaire de la Villa d'Este reste un exemple rare de performance technique durable, étudié aujourd'hui encore pour ses qualités de résilience et d'efficacité. ●