

Where does a machine end and a robot begin?

Où s'arrête la machine et où commence le robot?

EN

An excavator can follow a digital model. A crane can assemble components automatically. A robotic arm can be manually controlled. So where does a machine end and a robot begin?

A machine is any device that transforms energy into work. It can be powered manually, hydraulically, electrically or digitally. A robot is not much different from that, it is a particular type of machine: it is programmable, it can interact with its environment and perform physical tasks with some degree of autonomy.

In construction, robots can take many forms: from industrial robotic arms and drones to mobile platforms or conventional construction machinery enhanced with sensing and digital control.

FR

Une pelleteuse peut suivre un modèle numérique. Une grue peut assembler des éléments de façon automatique. Un bras robotisé peut être commandé manuellement. Où s'arrête la machine et où commence le robot ?

Une machine est un dispositif qui transforme de l'énergie en travail. Elle peut être actionnée manuellement, de façon hydraulique, électrique ou numérique. Un robot n'est pas fondamentalement différent : il s'agit d'un type de machine programmable, capable d'interagir avec son environnement et d'accomplir des tâches physiques avec une certaine autonomie.

Dans la construction, les robots ont des formes variées : bras industriels, drones, plateformes mobiles, ou engins de chantier dotés de commandes numériques.

The word *robot* is a relatively new addition to the English language. It first appeared in Karel Čapek's play *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*, written in 1920, for which his brother Josef invented the word. It derives from the Czech word *robota*, meaning compulsory or forced labour.

The original robots were not machines, but artificial workers created to perform labour for humans. More than a century later, the word still shapes the questions we ask about technology: which kinds of work should machines perform, and what should remain human?

Automation is not autonomy

Automation transfers the execution of a task to a machine. A CNC machine follows a predefined toolpath. An industrial robot repeats a predefined sequence. A computer script generates CAD geometry automatically. While these processes may be highly automated, their actions have already been prescribed.

Autonomy refers to what happens when the next exact action has not been specified. Autonomous systems use information from sensors or digital models to interpret changing conditions and select an appropriate course of action while pursuing a defined objective. Autonomy does not mean independence. People still set the goals, define the permitted actions, design the evaluation criteria, and determine the operation.

Nowadays many construction robots combine extensive automation with limited autonomy. They can execute complex tasks reliably, but they still depend on human supervision whenever the environment becomes too unpredictable.

Le mot *robot* est relativement récent en anglais. Il apparaît pour la première fois dans la pièce *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)* de Karel Čapek, écrite en 1920, un mot inventé par son frère Josef. Il dérive du terme tchèque *robota*, qui signifie travail forcé ou obligatoire.

Les robots originels n'étaient pas des machines, mais des ouvriers artificiels créés pour accomplir le travail humain. Un siècle plus tard, ce mot continue de façonner les questions adressées à la technologie : quels types de travail les machines doivent-elles accomplir, et lesquels doivent rester humains ?

L'automatisation n'est pas l'autonomie

L'automatisation confie l'exécution d'une tâche à une machine selon des actions prescrites à l'avance : une CNC suit une trajectoire prédéfinie, un robot industriel répète une séquence fixe, un script génère automatiquement une géométrie CAO.

L'autonomie concerne ce qui se passe quand l'action exacte n'a pas été spécifiée. Les systèmes autonomes utilisent des données de capteurs ou de modèles numériques pour interpréter des conditions changeantes et choisir une action appropriée, en poursuivant un objectif défini — sans pour autant être indépendants : ce sont toujours des humains qui fixent les objectifs, les actions permises, les critères d'évaluation et les conditions de fonctionnement.

Aujourd'hui, de nombreux robots de construction combinent automatisation poussée et autonomie limitée : faibles sur des tâches complexes, ils restent dépendants d'une supervision humaine dès que l'environnement devient trop imprévisible.

Robots on the Construction Site

Construction robots differ from most industrial robots since they operate in environments that are not fully predictable. Factory production is repetitive: components arrive in known positions, movements are carefully choreographed and the workspace is controlled.

Construction sites are different. Materials vary, tolerances accumulate, structures remain unfinished and conditions change with people, weather and incomplete information. Construction robots must therefore deal with uncertainty rather than repetition. Robotics does not always require replacing familiar construction equipment with purpose-built machines. Instead, new capabilities can be added through sensing, computation and control.

Rising from Rubble augments an overhead crane with digital sensing, computational planning and robotic fabrication to assemble structural walls from reclaimed concrete rubble. Irregular concrete fragments are first digitised through photogrammetry, computationally analysed and prepared using robotic drilling before being assembled by the crane. The crane itself remains a familiar construction machine, yet the overall system acquires new capabilities through perception, computation and human guidance.

Where, then, does the robot actually reside? Is it the crane, the robotic drilling station, the planning software or the complete workflow that connects them?

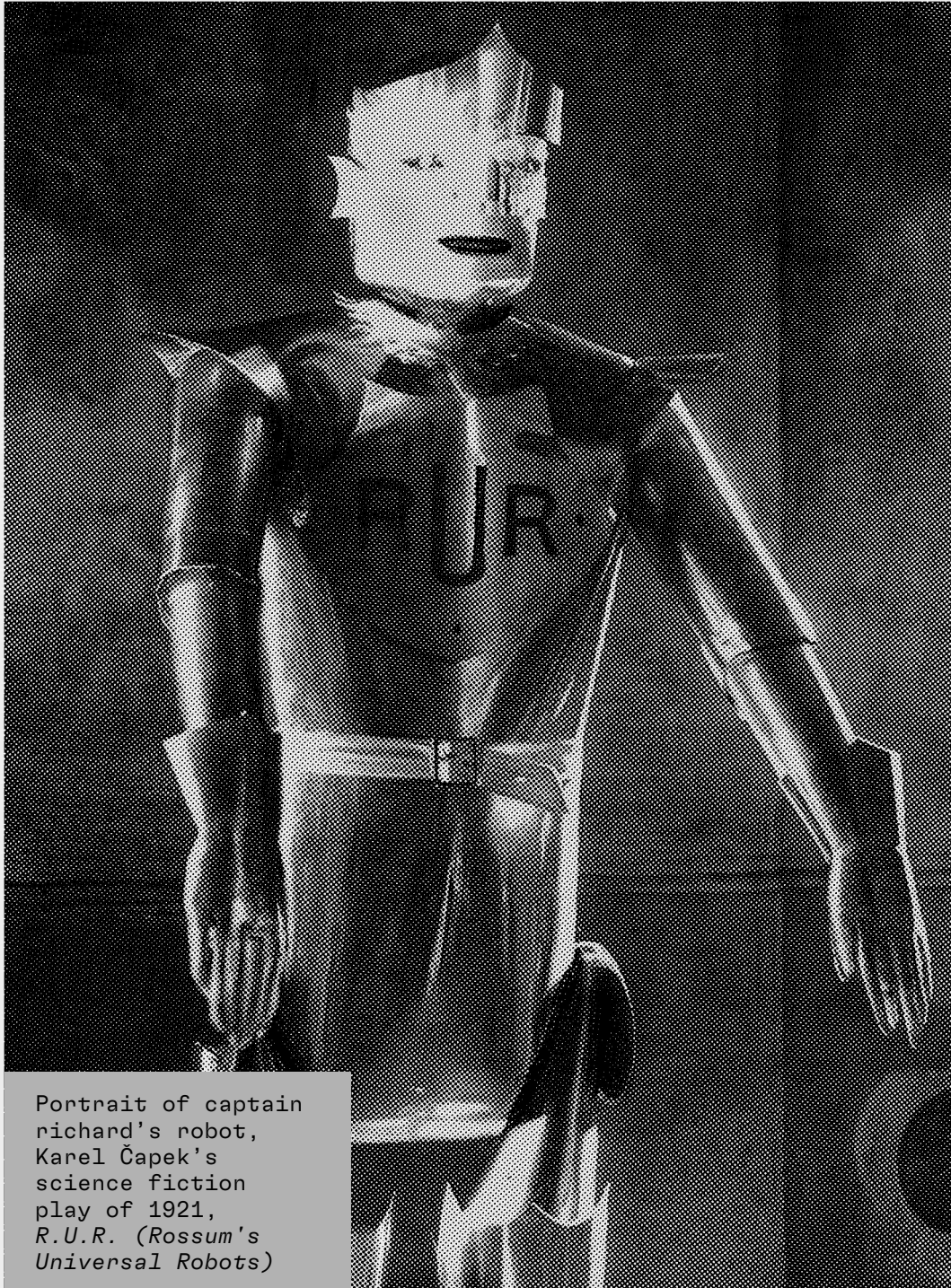
Le robot sur le chantier

Les robots de construction diffèrent de la plupart des robots industriels par le fait qu'ils opèrent dans des environnements qui ne sont jamais entièrement prévisibles. La production en usine est répétitive : les composants arrivent à des positions connues, les mouvements sont soigneusement chorégraphiés et l'espace de travail est contrôlé.

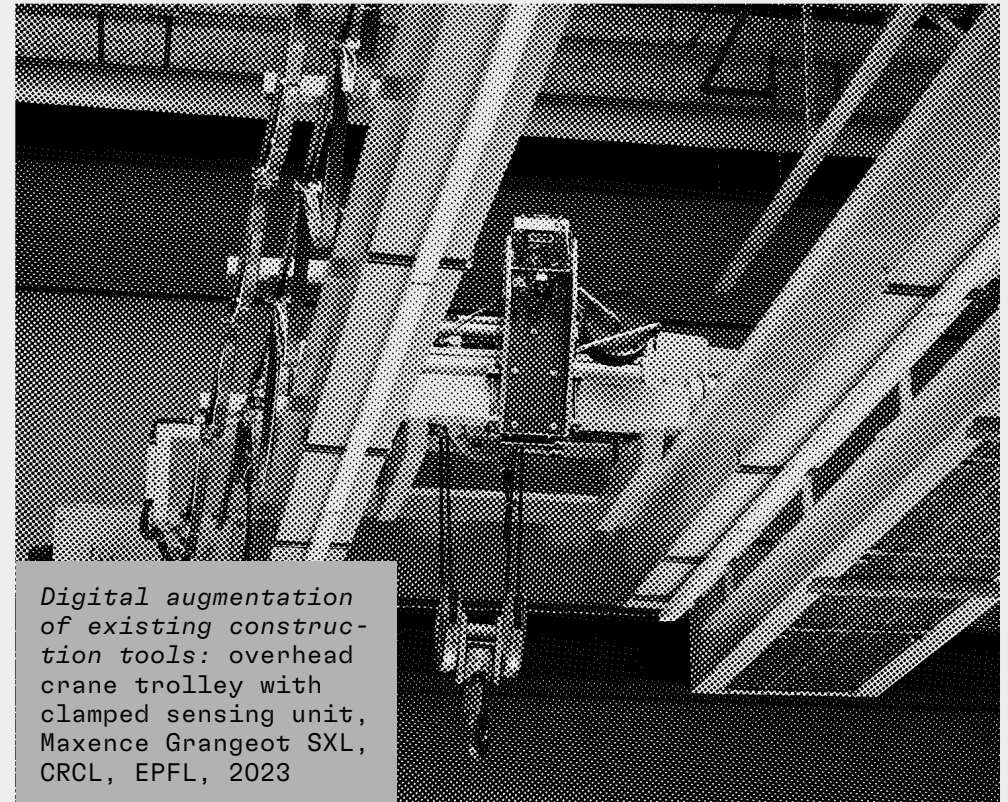
Dans le chantier, les matériaux varient, les tolérances s'accumulent, les structures restent inachevées et les conditions évoluent au gré des personnes ou du météo. Les robots de construction doivent donc composer avec l'incertitude plutôt qu'avec la répétition. La robotique n'exige pas de remplacer les équipements de chantier familiers par des machines conçues sur mesure. De nouvelles capacités peuvent au contraire être ajoutées grâce aux capteurs, au calcul et à la commande.

Le projet *Rising from Rubble* augmente un pont roulant de capteurs numériques, de planification computationnelle et de fabrication robotisée, afin d'assembler des murs porteurs à partir de gravats de béton récupérés. Les fragments de béton irréguliers sont d'abord numérisés par photogrammétrie, analysés informatiquement, puis préparés par perçage robotisé avant d'être assemblés par la grue. La grue elle-même reste un engin de chantier familier ; mais l'ensemble du système acquiert de nouvelles capacités grâce à la perception, au calcul et au guidage humain.

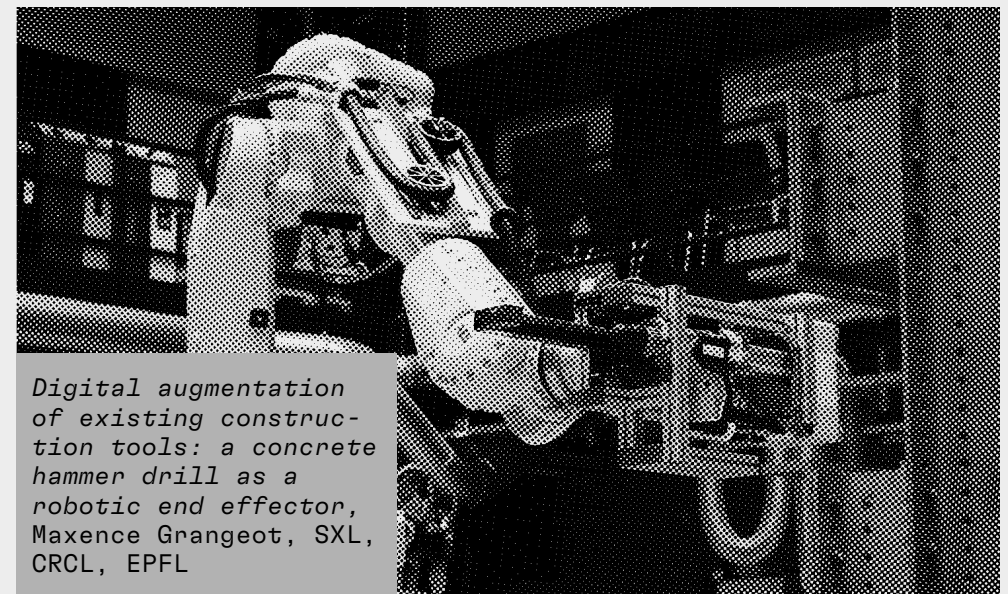
Où réside donc réellement le robot ? Est-ce la grue, la perceuse sur bras robotisée, le logiciel de planification, ou le processus complet qui les relie ?



Portrait of captain richard's robot, Karel Čapek's science fiction play of 1921, *R.U.R. (Rossum's Universal Robots)*



Digital augmentation of existing construction tools: overhead crane trolley with clamped sensing unit, Maxence Grangeot SXL, CRCL, EPFL, 2023



Digital augmentation of existing construction tools: a concrete hammer drill as a robotic end effector, Maxence Grangeot, SXL, CRCL, EPFL

When a robot enters construction sites, human work moves into supervision, repair, coordination and responsibility. Whether this is an improvement depends on who gains control, who is trained, who takes on the risk and whether practical knowledge is strengthened or subordinated to the machine.

Quand un robot arrive sur les chantiers, le travail humain se déplace vers la supervision, la réparation, la coordination et la responsabilité. Que ce soit une amélioration dépend de qui garde le contrôle, qui est formé, qui assume le risque, et si le savoir pratique est renforcé ou subordonné à la machine.



Assembly line production at Gunnison Housing Corporation, New Albany, Indiana, ca. 1937-1944. Courtesy of the Library of Congress.



Human and robot work together to relocate a roof beam; Dalila Romero Zenker, CRCL, EPFL, 2026

Where is the human?

Où se trouve l'humain ?

EN

Robots are often presented as a replacement for human labour. In construction, the promise is familiar: dangerous, repetitive and physically demanding tasks can be delegated to machines, making work safer, faster and more precise, while humans focus on more skilled and creative tasks. This redistribution can bring benefits. Robots can lift heavy components, repeat precise movements and operate where exposure to dust, noise, vibration or unstable conditions should be minimised.^{1,2} But removing a physical action does not remove human labour. It changes where that labour takes place, not necessarily making work more meaningful.

Before a robot can begin a task, someone must prepare the digital information, select the necessary tools, position the materials, establish the safety procedures and test the program. During operation, the human must supervise the process and respond when reality differs from the digital model. If an unexpected stop occurs, the operator must diagnose the problem, correct the data, and decide whether work can continue.

Automation can therefore transform work without necessarily improving it. A worker may exchange continuous physical effort for long periods of repetitive moni-

FR

Les robots sont souvent présentés comme un substitut au travail humain. C'est une promesse connue de la construction : déléguer les tâches dangereuses, répétitives et physiquement exigeantes aux machines pour rendre le travail plus sûr, rapide et précis, tandis que les humains se consacrent à des tâches plus qualifiées et créatives. Cette redistribution peut avoir des bénéfices. Les robots peuvent soulever des éléments lourds, répéter des mouvements précis et opérer là où l'exposition à la poussière, au bruit, aux vibrations doit être limitée.^{1,2} Mais supprimer une action physique ne supprime pas le travail humain. Au contraire, cela le déplace, sans pour autant lui donner du sens.

Avant qu'un robot entame une tâche, quelqu'un doit préparer la programmation numérique, choisir les outils, positionner les matériaux, établir les procédures de sécurité et les tests. Pendant l'opération, l'humain doit superviser le processus et intervenir lorsque la réalité s'écarte du modèle numérique. En cas d'arrêt imprévu, l'opérateur doit diagnostiquer le problème, corriger les données et décider si le travail peut se poursuivre.

L'automatisation peut transformer le travail sans nécessairement l'améliorer : un ouvrier peut échanger un effort physique continu contre de longues périodes

1. Parascho, Stefana. "Construction Robotics: From Automation to Collaboration." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 6, 2023, pp. 183–204

2. Rosen, Patricia Helen, Eva Heino, Elena Fries-Tersch, and Sascha Wischniewski. *Advanced Robotics and Automation: Implications for Occupational Safety and Health, Summary*. European Agency for Safety and Health at Work, 2022

toring, interrupted by brief but urgent interventions. New technical roles may emerge, but control can also become concentrated among specialists who operate the software and equipment. When tasks are poorly allocated, automation may create cognitive demands, reduce workers' sense of control or make practical skills subordinate to the machine.³

Deploying construction robots introduces unique site difficulties. Practical knowledge appears in small decisions and may be situational: noticing that a beam is warped, judging whether a connection can be retained or recognising that a minor discrepancy will create a later problem.

In a weak form of collaboration, the human becomes the robot's assistant, feeding components, clearing obstacles and handling every exception. The process remains organised around what the robot can understand. The person is expected to behave predictably and to become the other robot. Stronger collaboration requires each part to contribute and allows it to change as conditions emerge. Robots offer strength, precision, repeatability, and the ability to process information. Humans, on the other hand, contribute judgement, intuition, improvisation, and the ability to redefine a problem when the original plan is no longer applicable.

Truss from Trash explores this approach using irregular timber offcuts. Designers can adapt a developing timber truss using the available timber pieces, while the robot performs repetitive motions, like picking, cutting and placement operations that benefit from precision and repeatability.⁴

de surveillance répétitive, interrompues par de brèves mais urgentes interventions. De nouveaux rôles peuvent émerger, mais le contrôle peut aussi se concentrer entre les mains des spécialistes qui pilotent logiciels et équipements. Mal réparties, les tâches peuvent accroître la charge cognitive, réduire le sentiment de contrôle ou subordonner les savoir-faire pratiques à la machine.³

La mise en œuvre de robots de construction pose des défis particuliers sur les chantiers. Le savoir pratique se manifeste dans des décisions situationnelles : remarquer qu'une poutre est voilée, juger si un assemblage peut être conservé, ou percevoir qu'un écart mineur créera un problème ultérieur.

Dans une collaboration faible, l'humain devient l'assistant du robot : il alimente les composants, dégage les obstacles et gère les exceptions. Le processus reste organisé autour de ce que le robot comprend. La personne est censée se comporter de façon prévisible, devenant elle-même un second robot. Une collaboration plus forte exige que chaque partie apporte sa contribution et puisse évoluer à mesure que les conditions changent. Les robots offrent force, précision, répétabilité et capacité de traitement de l'information. Les humains apportent jugement, intuition, improvisation et la capacité de redéfinir un problème.

Le projet *Truss from Trash* explore cette approche à partir de chutes de bois irrégulières. L'humain peut ainsi adapter une ferme de charpente en cours de réalisation selon les chutes disponibles, tandis que le robot effectue les mouvements répétitifs et précis (prélèvement, découpe, positionnement).⁴

3. Rosen, Patricia Helen, Eva Heino, Elena Fries-Tersch, and Sascha Wischniewski. *Advanced Robotics and Automation: Implications for Occupational Safety and Health, Summary*. European Agency for Safety and Health at Work, 2022

4. Skevaki, Eleni, Eric Duong, Hong-Bin Yang, and Stefana Parascho. "Truss from Trash: A Human-Robot Framework for Adaptive Timber Assembly on the Construction Floor." *Construction Robotics*, vol. 10, 2026, article 2

In *ReConfig*, the researchers work with existing timber structures. Rather than allocating specific tasks to humans and robots, we examine workflows in which both parties continuously inform each other. Instead of relying on a complete digital model prepared in advance, the workflow combines robotic sensing, structural analysis and human judgement to make decisions as new conditions are revealed during construction. The robot might manipulate heavy elements, support scanning, execute repetitive operations, while humans make fine adjustments, evaluate the results, and adapt the process as new information emerges.⁵

The human does not disappear when a robot enters construction site. Human work moves into planning, supervision, interpretation, repair, coordination and responsibility. Whether this is an improvement depends on who gains control, who receives training, who carries the remaining risk and whether practical knowledge is strengthened or is subordinated to the machine.

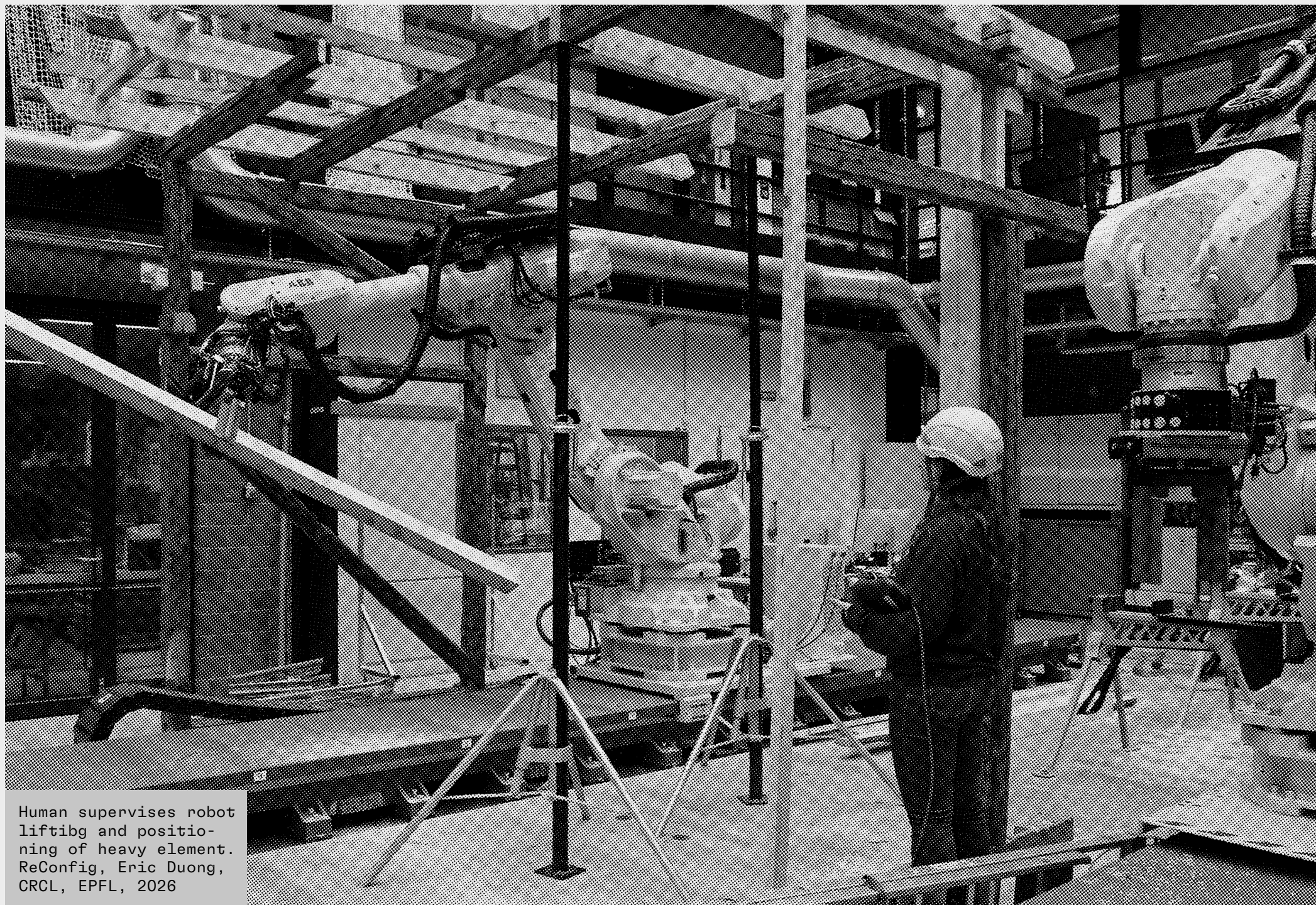
The question should not (only) be whether robots will replace humans, but rather what kind of relationship we want to establish with them. If automation merely transforms humans into machine supervisors, little has changed. If robots and humans contribute different forms of knowledge, construction will become more efficient, as well as potentially more adaptive, resilient and creative. The authority to decide why the work is being done, what risks are acceptable, and whose needs it is meant to serve should remain human.

Dans *ReConfig*, les chercheurs·euses travaillent à partir de structures en bois existantes. Plutôt que de répartir des tâches spécifiques entre humains et robots, les deux parties s'informent en continu. Au lieu de s'appuyer sur un modèle numérique complet préparé à l'avance, le processus combine détection robotisée, analyse structurelle et jugement humain, afin de prendre des décisions lorsque que de nouvelles conditions émergent. Le robot manipule les éléments lourds, assiste le scan ou exécute des opérations répétitives, tandis que l'humain effectue des ajustements fins, évaluent les résultats et adaptent le processus au fil des informations nouvelles.⁵

Dans ce contexte, l'humain ne disparaît pas lorsqu'un robot entre sur le chantier. Son travail se déplace vers la planification, la supervision, l'interprétation, la réparation, la coordination et la responsabilité. Que cela constitue un progrès dépend de qui possède le contrôle, qui reçoit une formation, assume le risque, et si le savoir pratique est renforcé ou subordonné à la machine.

La question ne devrait pas (seulement) être de savoir si les robots remplaceront les humains, mais quel type de relation nous souhaitons établir avec eux. Si l'automatisation ne fait que transformer les humains en superviseur·euse·x de machines, peu de choses auront changé. Si robots et humains apportent chacun des formes de savoir différentes, la construction gagnera en efficacité, tout en devenant plus adaptable, résiliente et créative. L'autorité de prise de décision sur le travail effectué, les risques acceptables et qui doit en profiter doit, elle, rester humaine.

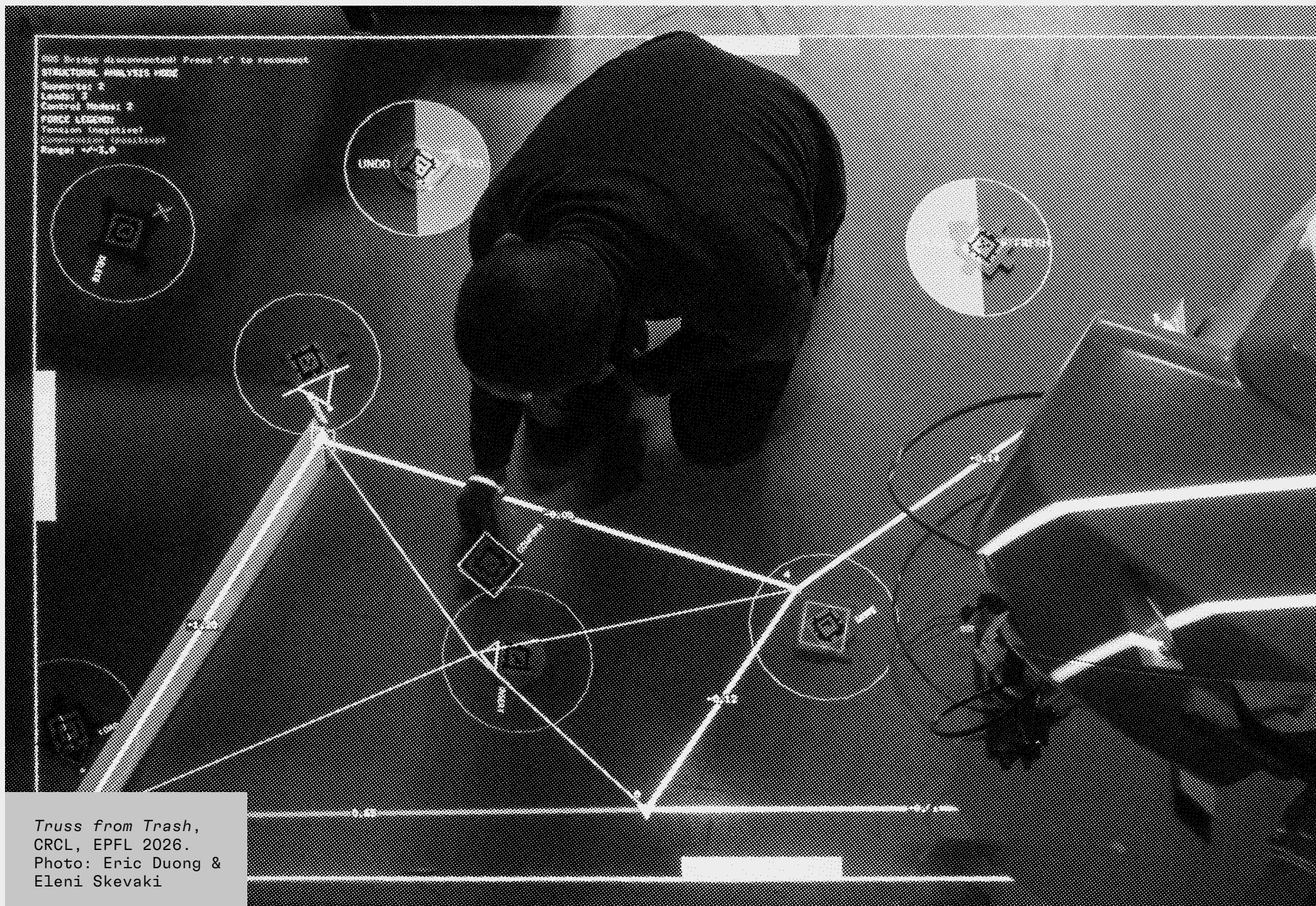
5. CRCL and SXL, EPFL.
*ReConfig: Human-Robot
Adaptive Workflows for
Disassembly, Repair, and
Construction*. Public
project documentation,
2026



Human supervises robot
lifting and positioning of heavy element.
ReConfig, Eric Duong,
CRCL, EPFL, 2026

The revolution may not be the robot itself. It may be the reorganization of design, labour, knowledge and access required to make the robot useful.

La révolution ne réside peut-être pas dans le robot lui-même. Elle réside dans la réorganisation de la conception, du travail, du savoir et de l'accès nécessaire pour rendre le robot utile.



Technical revolution or permanent

Révolution technique ou prototype permanent ?

prototype?

EN

Robots are often presented as machines that promise to build faster or work more precisely. But a robot rarely replaces one worker or tool directly. It may perform one movement faster while the surrounding process becomes slower, more expensive or more dependent on specialists. The real test of a revolution is therefore not the novelty of the machine, but whether the organisation of construction changes with it.

The visible robot, the hidden work

For a construction robot to begin acting, a task must be translated into data. Geometry must be modelled, movements planned, tools selected, materials prepared and the machine calibrated. Safety procedures must be established and the result tested and adjusted.

FR

Les robots sont souvent présentés comme des machines promettant de construire vite et avec précision. Mais un robot remplace rarement une personne ou un outil. Il pourrait se mouvoir plus rapidement, tandis que l'ensemble du processus devient plus lent, plus coûteux ou dépendant de spécialistes. La véritable révolution n'est pas dans la nouveauté de la machine, mais bien dans la transformation de l'organisation de la construction.

Le robot visible, le travail invisible

Pour qu'un robot de construction puisse agir, une tâche doit d'abord être traduite en données. La géométrie doit être modélisée, les mouvements planifiés, les outils sélectionnés, les matériaux préparés et la machine calibrée. Les procédures de sécurité doivent être établies, puis le résultat testé et ajusté.

Design → programming → setup → execution →
verification → adjustment

A change at one stage will affect the following ones. A new geometry may need new movements. A variation in the material may require different tools or settings. A process that works in simulation may fail when conditions change on site. Robotic construction is therefore not simply the automation of one movement. Robotics connects design, production, logistics, safety and human judgement in a single process.⁶

The “lot-size-one” problem

Factory automation works because the same operation can be repeated thousands of times. The cost of programming, testing and tooling is distributed across many identical products.

Buildings are different: they respond to particular sites, different clients, changing regulations and materials. Even when parts are prefabricated, the complete building is usually produced only once or in a small series. A robotic process should therefore be adapted, programmed and tested for every project. The preparation can consume more time and money than the robot eventually saves.³ This does not mean that unique buildings cannot be automated. It means that the work surrounding the robot must be included when judging its value.

Complexity changes the calculation

Automation can become worthwhile when a robot handles shapes, materials or assembly sequences that are especially difficult to construct conventionally. While manual construction may remain competitive for a

Conception → programmation → réglage → exécution →
vérification → ajustement

Un changement à une étape se répercute : une nouvelle géométrie ou une variation du matériau exige d'autres mouvements et outils. Un processus qui fonctionne en simulation peut échouer lorsque les conditions d'un chantier changent. La construction robotisée n'est pas simplement l'automatisation d'un mouvement. La robotique relie conception, production, logistique, sécurité et discernement humain dans un même processus.⁶

Le problème du « lot unitaire »

L'automatisation en usine fonctionne parce qu'une même opération est répétée des milliers de fois. Le coût de la programmation, des essais et de l'outillage se répartit sur un grand nombre de produits identiques.

Les bâtiments sont différents : ils répondent à des sites, à des réglementations et des matériaux changeants. Même lorsque des éléments sont préfabriqués, un bâtiment est produit une seule fois ou en petite série. Un processus robotisé devrait être adapté, programmé et testé pour chaque projet. La préparation peut consommer plus de temps et d'argent que ce que le robot permet d'économiser.³ Cela n'exclut pas l'automatisation de bâtiments uniques, mais le travail entourant le robot doit entrer dans l'évaluation de sa valeur.

La complexité change le calcul

L'automatisation peut être rentable lorsqu'un robot traite des formes, matériaux ou séquences d'assemblage particulièrement difficiles à réaliser de façon conventionnelle. Si la construction manuelle reste compétitive

6. Parascho, Stefana.
“Construction Robotics:
From Automation to
Collaboration.” Annual
Review of Control,
Robotics, and Autonomous
Systems, vol. 6, 2023,
pp. 183–204

simple straight wall, robotic fabrication becomes more productive when the geometry complexity increased.⁷ Complexity, repetition and continued use can justify the initial investment. A system whose tools, code and knowledge can be reused across several projects can become practical. Robotic construction therefore needs more than accurate repetition. It needs processes that can adjust. In flexible automation tools, code and workflow can be adapted in real time without rebuilding the entire process from zero.

Rigid automation → System difficult to modify → Defined geometry & materials → Fixed processes → Predefined tasks → Predefined tools → Stable inputs → Repeated output

Flexible automation → Adjustable system → Variable geometry & materials → Reusable processes & tools → Adaptable tasks while operation → Reusable and changing tools → Multiple inputs → Task-specific output

New skills, new responsibilities

Operating a construction robot is not simply a matter of pressing “start.” One must prepare data, plan tasks, calibrate equipment, manage safety, recognize errors and adjust the process when conditions or intents change.

This creates new combinations of skills. Practical knowledge of materials and assembly may need to be combined with digital modelling, robot control, effective communication and troubleshooting.⁸ Robotics may replace one barrier with another: making specialist training, software and technical support become more important. A simple interface may allow a worker to start or supervise a machine without giving them control over the wider process. Programming, maintenance and problem-solving may remain concentrated in the hands of a small number of specialists. Robotics

pour un mur droit, la fabrication robotisée devient plus productive à mesure que la complexité géométrique augmente.⁷ Complexité, répétition et usage prolongé peuvent justifier l'investissement initial. Un système réutilisable sur plusieurs projets devient viable ; la construction robotisée exige des processus capables de s'ajuster, pas seulement une répétition précise. Dans l'automatisation flexible, les outils, le code et le flux de travail peuvent être ajustés en temps réel, sans reconstruire l'ensemble du processus depuis zéro.

Automatisation rigide → Système difficile à modifier → Géométrie et matériaux définis → Processus fixes → Tâches prédéfinies → Outils prédéfinis → Entrées stables → Résultat répété

Automatisation flexible → Système modulable → Géométrie et matériaux variables → Processus et outils réutilisables → Tâches adaptables en cours d'opération → Outils réutilisables et modifiables → Entrées multiples → Résultat spécifique à la tâche

Nouvelles compétences et responsabilités

Opérer un robot de construction ne se résume pas à appuyer sur démarrer. Il faut préparer les données, planifier les tâches, calibrer l'équipement, gérer la sécurité, repérer les erreurs et ajuster le processus lorsque les conditions ou les intentions changent.

De nouvelles combinaisons de compétences émergent : le savoir pratique des matériaux et de l'assemblage doit se combiner à la modélisation numérique, au pilotage robotique et à la résolution de problèmes.⁸ La robotique peut remplacer une barrière par une autre — formation spécialisée, logiciels et support technique devenant plus déterminants. Une interface simple peut permettre de démarrer ou superviser une machine sans en contrôler le processus, mais la programmation et la maintenance restent concentrées entre les mains de

7. Brosque, Cynthia, and Martin Fischer. “Safety, Quality, Schedule, and Cost Impacts of Ten Construction Robots.” *Construction Robotics*, vol. 6, 2022, pp.163–186

8. Skill Delgado, Juan Manuel, et al. “Robotics and Automated Systems in Construction: Understanding Industry-Specific Challenges for Adoption.” *Journal of Building Engineering*, vol. 26, 2019, article 100868

therefore changes who plans the work, who can modify it and who takes responsibility.

Access is more than technical knowledge

Economic uncertainty, technical limitations, work culture and unclear financial returns remain major barriers to adoption of robots in construction.⁹ These barriers do not affect every organization equally: large contractors and research institutions may be able to experiment, employ specialists and absorb the cost of failure. Smaller practices often need the technology to produce an immediate and reliable return. Using the software, construction data and technical knowledge become as important as owning the robot.

Robots could also be shared, rented or provided as a specialized service rather than purchased. This could make the equipment available to more people, but it may also create dependence on external providers. Without reusable systems, accessible interfaces, training and shared infrastructure, robotics may widen the gap between well-funded institutions and smaller practices. The technology may thus be available in principle yet inaccessible in practice.

If preparing and maintaining a robotic process requires more resources than completing the task conventionally, what makes it worthwhile? If small changes require the whole system to be redesigned, or if problems can be solved only by the original developers, automation will relocate the difficulty instead of reducing it. The revolution may not be the robot itself. It may be the reorganization of design, labour, knowledge and access required to make the robot useful.

spécialistes. La robotique modifie ainsi qui planifie le travail, qui peut le modifier et qui assume la responsabilité en cas de problème.

L'accessibilité dépasse le seul savoir technique

L'incertitude économique, les limites techniques, la culture du travail et le manque de clarté sur le retour financier freinent l'adoption des robots dans la construction.⁹ Les grandes entreprises et institutions de recherche peuvent se permettre d'expérimenter et d'absorber l'échec ; les petites structures, elles, ont besoin d'un retour immédiat et fiable. Le savoir technique lié aux logiciels et aux données de construction compte autant que la possession du robot.

Les robots pourraient aussi être partagés, loués ou proposés comme service, plutôt qu'achetés. Cela rendrait l'équipement plus accessible, mais créerait une dépendance envers des prestataires externes. Sans systèmes réutilisables, interfaces accessibles, formation et infrastructure partagée, la robotique risque de creuser l'écart entre institutions bien financées et petites structures — la technologie restant disponible en principe, mais inaccessible en pratique.

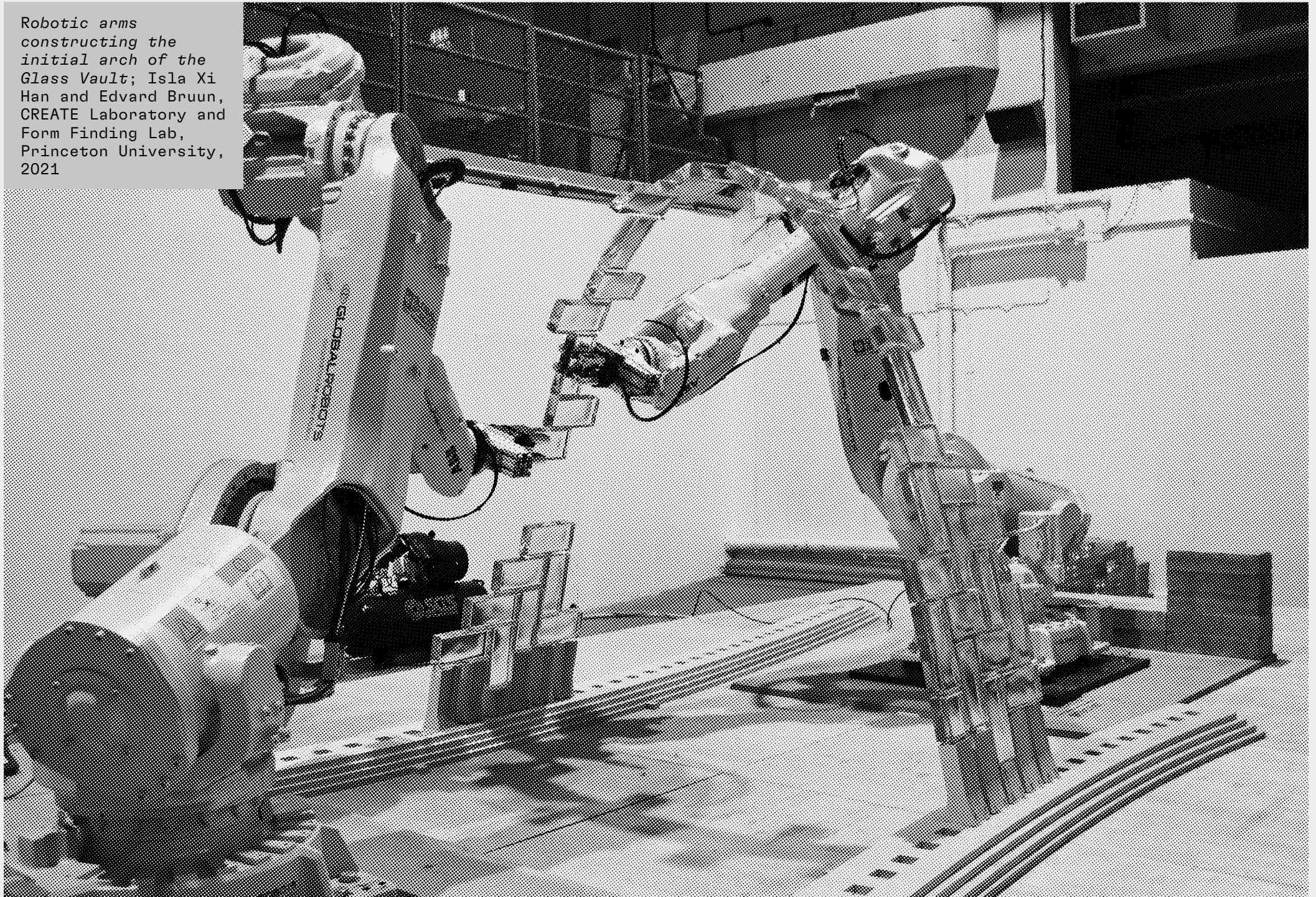
Si préparer et entretenir un processus robotique coûte plus qu'une méthode conventionnelle, qu'est-ce qui en justifie l'intérêt ? Si le moindre changement exige de repenser tout le système, ou si seuls les développeurs peuvent résoudre les problèmes, l'automatisation ne fera que déplacer la difficulté. La révolution ne réside peut-être pas dans le robot lui-même. Elle réside dans la réorganisation de la conception, du travail, du savoir et de l'accès nécessaire pour rendre le robot utile.

9. Skill Delgado, Juan Manuel, et al. "Robotics and Automated Systems in Construction: Understanding Industry-Specific Challenges for Adoption." *Journal of Building Engineering*, vol. 26, 2019, article 100868



*ReConfig, Human-robot
adaptive workflows for
disassembly, repair,
and construction,
CRCL, EPFL, 2025*

Robotic arms
constructing the
initial arch of the
Glass Vault; Isla Xi
Han and Edvard Bruun,
CREATE Laboratory and
Form Finding Lab,
Princeton University,
2021



Robots for what?

Les robots pour quoi faire ?

EN

The apparent contradiction

Construction robots are often presented through spectacular prototypes, experimental pavilions and bespoke buildings. Meanwhile, most everyday construction remains manual. But a prestigious project does not automatically need a robot, and an ordinary project may contain a task that strongly justifies one. The more useful distinction is not between special architecture and common buildings, but between different kinds of tasks. Three reasons for using a robot:

Repeat

Some robots perform a clearly defined operation often enough for the investment of automation to be distributed over many repetitions: such as drilling, construction layout, tying reinforcement, pile driving, or brick/-block placement. The architectural status of the building is irrelevant. The possible justification lies in the number of holes, the physical strain of overhead drilling, and the availability of reliable digital data. However, repetition alone is not enough. Transport, access, calibration, supervision, maintenance and coordination with other work can determine whether the robot is suitable for a particular site. Even if a task repeats thousands of

FR

La contradiction apparente

Les robots de construction sont souvent présentés avec des prototypes spectaculaires ou des bâtiments expérimentaux. Pourtant, la majorité de la construction reste manuelle. Mais un projet prestigieux n'a pas nécessairement besoin d'un robot, tandis qu'un projet ordinaire peut comporter une tâche qui en justifie l'usage. La distinction la plus pertinente ne se situe pas entre architecture exceptionnelle ou ordinaire, mais entre les différents missions. Trois raisons de recourir à un robot :

Répéter

Certains robots exécutent une opération clairement définie, pour que l'investissement dans l'automatisation se répartisse sur de nombreuses répétitions : perçage, ligature d'armatures, battage de pieux ou pose de blocs. Le statut architectural importe peu. La justification réside dans le nombre de trous à percer, la pénibilité physique du perçage en hauteur et la disponibilité de données numériques fiables. La répétition seule, cependant, ne suffit pas. Le transport, l'accessibilité, la calibration, la supervision, la maintenance et la coordination avec les autres corps de métier sont déterminants. Même si une tâche se répète des milliers de fois, cela ne

times, it doesn't mean the complete system fits the construction process.

Enable

A robot may be used to enable a new construction method, and not because it has already been shown to be cheaper or faster than conventional work.

LightVault, for example, is a full-scale, vault assembled from 338 glass bricks using two industrial robotic arms. During the first stage, the robots alternated between placing bricks and providing temporary support for the unfinished structure. Once a stable central arch had formed, construction continued outwards. Structural form, brick geometry, assembly sequence, robot reach and temporary support were all developed in tandem. The robots did not simply execute a finished design; they participated in a construction logic organised around the changing stability of the incomplete structure.¹⁰ *LightVault* is a research demonstrator, not evidence that robotic masonry is generally faster or cheaper. Its value lays in testing a scaffold-free assembly method and exploring how structural design and robotic construction could be integrated.

Adapt

Existing buildings and reclaimed materials present a different challenge. The geometry, condition and connections of these structures may not be fully apparent until work begins.

ReConfig investigates how robots and people can transform existing timber structures while preserving the materials used. Robots can support scanning, lifting,

garantit pas que l'ensemble du système s'intègre au processus de construction.

Rendre possible

Un robot peut rendre possible une nouvelle méthode de construction — pas parce qu'il est déjà moins coûteux ou plus rapide que le travail conventionnel.

LightVault, par exemple, est une voûte à échelle réelle, assemblée à partir de 338 briques de verre à l'aide de deux bras robotisés industriels. Lors de la première phase, les robots alternaient entre la pose des briques et le maintien temporaire de la structure inachevée. Une fois l'arc central stabilisé, la construction s'est poursuivie vers l'extérieur. La forme structurelle, la géométrie des briques, la séquence d'assemblage, la portée des robots et le support temporaire ont été développés de façon conjointe. Les robots ont participé à une logique de construction organisée autour de la stabilité changeante de la structure inachevée.^{10s} *LightVault* est un démonstrateur de recherche. Sa valeur réside dans le fait d'avoir testé une méthode d'assemblage sans échafaudage et d'avoir exploré comment la conception structurelle et la construction robotisée peuvent s'intégrer.

Adapter

Les bâtiments existants et les matériaux réemployés posent un défi différent. La géométrie, l'état et les assemblages de ces structures sont souvent des inconnus avant le début des travaux.

ReConfig explore comment robots et personnes peuvent transformer des structures en bois existantes tout en préservant les matériaux utilisés. Les robots

10. Parascho, Stefana, et al. "LightVault: A Design and Robotic Fabrication Method for Complex Masonry Structures." *Advances in Architectural Geometry* 2020, published 2021, pp.350–375

positioning and cutting. People remove fasteners, assemble connections, make fine adjustments, and respond to unforeseen circumstances.¹¹ Here, the robot is not performing an identical action repeatedly or producing a completely predetermined object. The digital design becomes a flexible target rather than a fixed instruction. New scans and structural information can alter the sequence as the work progresses. This is particularly relevant for repair, renovation and reuse projects, where variation is not an error, but an unavoidable part of the process.

A robot may be technically capable of a task yet remain unused because setup and programming costs are high, labour is cheaper, or responsibility for operating and maintaining the system is unclear.

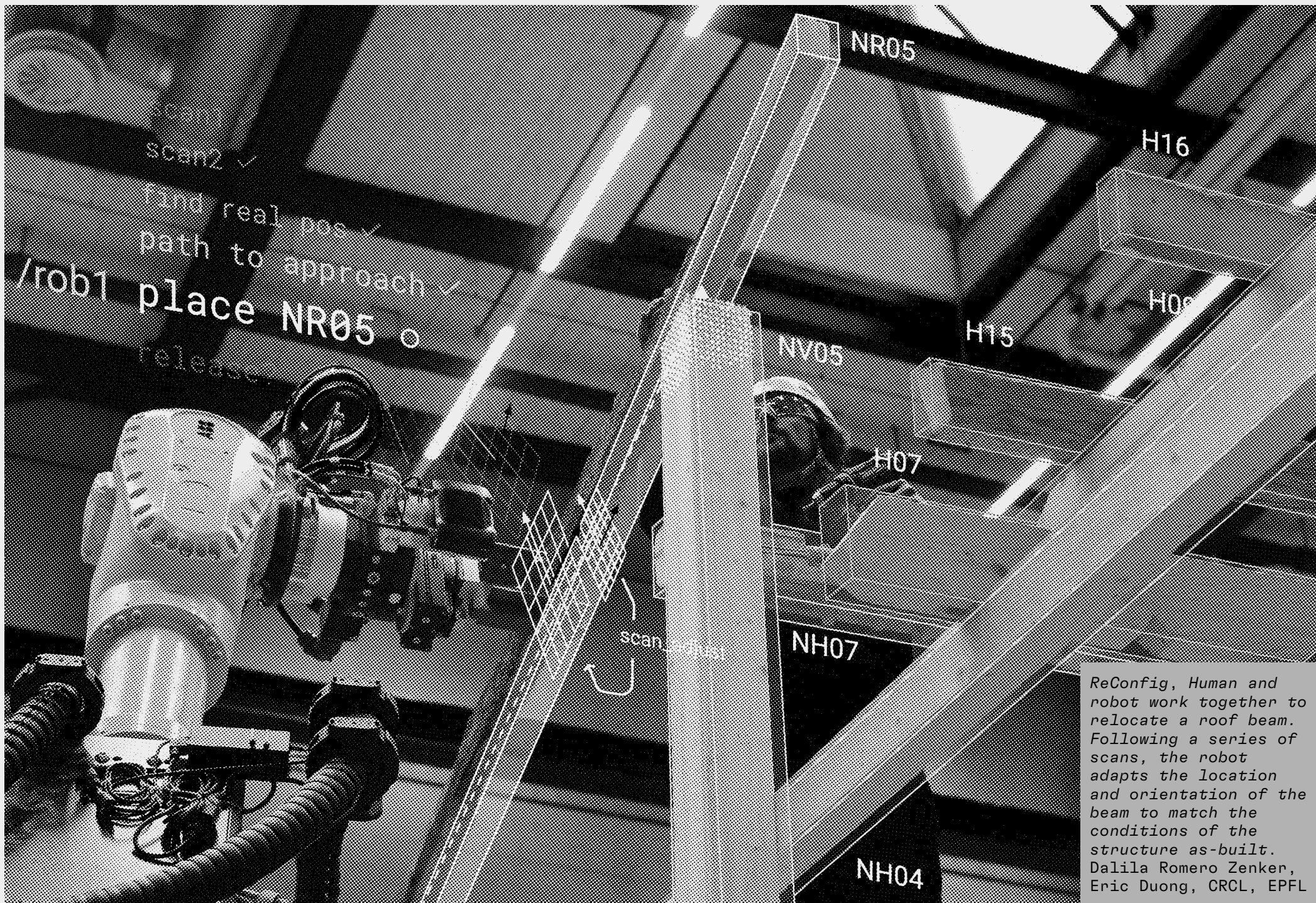
Low-paid manual labour is not the same as an efficient or socially desirable process. Workers often have limited access to training and technology and are treated as replaceable. A task may stay manual simply because workers absorb strain, risk and uncertainty more cheaply than a robotic system would. There is no automatic justification for using a robot in construction — its value lies in enabling what would otherwise be difficult, unsafe or impractical. Renovation and reuse projects may benefit from robotics given uncertain, hazardous site conditions. The relevant question is whether the robot improves what is built, how it is built, and the conditions under which operators work.

assistent dans le scan, le levage, le positionnement et la découpe. Les personnes retirent les fixations, assemblent les liaisons, effectuent des ajustements fins et répondent aux imprévus.^{11<} Ici, le robot ne répète pas une action identique ni ne produit un objet prédéterminé. La conception numérique devient flexible : de nouvelles informations peuvent modifier la séquence en cours de travail. Cela est particulièrement pertinents dans les projets de réparation et de réemploi, où la variation n'est pas une erreur, mais une composante inévitable du processus.

Un robot peut être techniquement capable d'une tâche mais rester inutilisé car les coûts de mise en œuvre sont élevés, la main-d'œuvre moins chère, ou la responsabilité d'exploitation et de maintenance floue.

Un travail manuel mal payé n'équivaut pas à un processus efficace ou socialement souhaitable. Les travailleurs·euses·x ont souvent un accès limité à la formation et à la technologie, et sont traités comme remplaçables. Une tâche peut rester manuelle simplement parce que les humains absorbent la pénibilité, le risque et l'incertitude à moindre coût qu'un système robotique. Il n'y a aucune justification automatique à l'usage d'un robot en construction — sa valeur réside dans ce qu'il permet de réaliser, sinon difficile, dangereux ou impraticable. Les projets de rénovation et de réemploi peuvent bénéficier de la robotique face à des conditions de chantier incertaines et dangereuses. La question est de savoir si le robot améliore l'ouvrage, sa réalisation, et les conditions de travail.

11. CRCL and SXL, EPFL.
*ReConfig: Human-Robot
Adaptive Workflows for
Disassembly, Repair, and
Construction*. Public
project documentation,
2026



ReConfig, Human and robot work together to relocate a roof beam. Following a series of scans, the robot adapts the location and orientation of the beam to match the conditions of the structure as-built. Dalila Romero Zenker, Eric Duong, CRCL, EPFL

The central question is not whether the robot is faster. Rather, it is whether the complete system produces a worthwhile result using fewer total resources, involving less risk, and providing better working conditions than the available alternatives.

La question centrale n'est pas de savoir si le robot est plus rapide. Il s'agit plutôt de savoir si le système, dans son ensemble, produit un résultat qui en vaut la peine, avec moins de ressources au total, moins de risques, et de meilleures conditions de travail que les alternatives disponibles.

Efficient for whom?

Efficace pour qui?

EN

Effectiveness asks whether the intended result was achieved. *Efficiency* asks what resources were required to achieve it.¹² A process may therefore be effective without being efficient; it may produce the required wall, joint or structure, but consume excessive time, labour, energy, material or money in the process.

In robotic construction, the answer depends on what is measured and where the boundary of the calculation is drawn. Is the unit of comparison one robotic movement, a construction phase, a building's lifetime or even the timescale of material production, and use? Does the calculation end when the robot stops, or does it include preparation, maintenance, and the surrounding human work? And who benefits from this efficiency?

Beyond the robot's cycle time

We tend to search for quantifiable factors to evaluate efficiency. But these rarely describe comprehensively what matters in construction. An independent study of ten construction robots across twelve projects found mixed results: six cases reduced total costs, while four increased them. At the level of a whole project, the calculation must also include programming, transportation, installation, calibration, site preparation, supervi-

FR

L'efficacité (*effectiveness*) s'intéresse au résultat à atteindre. Le rendement (*efficiency*) s'intéresse aux ressources nécessaires pour l'atteindre.¹² Un processus peut être efficace sans être performant en termes de rendement : il peut produire le mur ou la structure requise, tout en consommant un temps, un travail, une énergie, un matériau ou un budget excessif.

Dans la construction robotisée, la réponse dépend de ce que l'on mesure et de la limite du calcul. L'unité de comparaison est-elle un seul mouvement robotisé, une phase de construction, la durée de vie d'un bâtiment, ou l'échelle temporelle de la production et des matériaux ? Le calcul s'arrête-t-il quand le robot s'arrête, ou inclut-il la préparation, la maintenance et le travail humain ? À qui profite ce rendement ?

Au-delà du temps de cycle du robot

Nous avons tendance à rechercher des facteurs quantifiables pour évaluer le rendement. Mais ceux-ci décrivent rarement, de façon complète, ce qui importe réellement en construction. Une étude indépendante sur dix robots de chantier et douze projets a donné des résultats mitigés : coûts en baisse dans six cas, en hausse dans quatre. À l'échelle d'un projet entier, le calcul doit aussi

12. ISO/TC 176. *The Terms and Definitions of ISO/TC 176 Standards: Alphabetical Listing*. Public ISO terminology document, 2022

sion, maintenance, downtime, training of workers, coordination with other trades, rework, and removal of the equipment.

While a robot may perform repetitive movements quickly once operational, the complete workflow may remain expensive or slow. Quality must also be considered. Precision, safety and durability are not resources to be minimised, but rather required outcomes. A process that uses fewer resources is not successful if the result is defective, unsafe or unsuitable. However, not everything can be quantified, nor can all value be expressed in resources. The presence of a robot does not guarantee an efficiency benefit.

Where does the work go?

Construction robots rely on people to prepare materials and information, inspect results, maintain equipment and recover from failures.¹³ Some difficult residual tasks may remain with workers because they are hard to formalise, rather than because they are valuable to human workers. A narrow calculation may record fewer direct labour hours while ignoring tacit knowledge, long-term health effects, and insecure employment.

Faster, but better?

Efficiency must also consider the experience of those working with the system. Have heavy lifting and repetitive strain been reduced? Have workers gained useful skills and greater authority? Or have they become responsible for passive monitoring, machine-controlled work rhythms and emergency recovery?

inclure la programmation, le transport, l'installation, la calibration, la préparation du chantier, la supervision, la maintenance, les temps d'arrêt, la formation du personnel, la coordination avec les autres corps de métier, les reprises et le retrait de l'équipement.

Même si un robot peut exécuter rapidement des mouvements répétitifs une fois en fonctionnement, l'ensemble du processus peut rester coûteux ou lent. La qualité doit également être prise en compte. Précision, sécurité et durabilité sont des résultats requis. La présence d'un robot ne garantit donc pas un gain de rendement.

Où va le travail ?

Les robots de construction dépendent de personnes pour préparer les matériaux et les informations, inspecter les résultats, entretenir l'équipement et corriger les défaillances.¹³ Certaines tâches résiduelles peuvent rester assurées par le personnel, non pas parce qu'elles ont de la valeur à leurs yeux, mais parce qu'elles sont difficiles à formaliser. Un calcul restreint peut ainsi enregistrer moins d'heures de travail direct, tout en ignorant le savoir tacite, les effets sur la santé à long terme et la précarité de l'emploi.

Plus rapide, mais meilleur ?

Le rendement doit aussi considérer l'expérience des personnes qui travaillent avec le système. Le port de charges et les efforts répétitifs ont-ils diminué ? Le personnel a-t-il gagné en compétences et en autorité ? Ou est-il devenu responsable d'une surveillance passive, d'un rythme de travail dicté par la machine et de la reprise d'urgence ?

13. Parascho, Stefana. "Construction Robotics: From Automation to Collaboration." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 6, 2023, pp. 183–204

While advanced robotics can improve occupational safety, they can also introduce cognitive, organisational and psychosocial risks. Poorly designed automation can increase the mental workload, reduce workers' control, intensify work and contribute to deskilling.¹⁴ This changes the meaning of 'labour saving'. Reducing labour hours does not automatically create a better process. The important questions are: who benefits from the savings? Who performs the remaining tasks? Who is responsible when the system fails?

Task division

Entire occupations should not be classified as either human or robotic. Tasks can be divided. A machine could lift or position a component while a person aligns it, checks the connection or changes the plan. Task allocation is both a technical and a social decision. Should dangerous work remain human simply because labour costs less than automation? Who gains control when the process becomes digital? Whose time, knowledge and risk are factored into the equation?

The central question is not whether the robot is faster. Rather, it is whether the complete system produces a worthwhile result using fewer total resources, involving less risk, and providing better working conditions than the available alternatives.

A construction process cannot be considered efficient if its apparent benefits depend on concealing preparation, transferring hazards, or excluding impacts that fall outside the robot's immediate cycle.

Une automatisation mal conçue peut accroître la charge mentale, réduire le sentiment de contrôle, intensifier le travail et contribuer à la déqualification.¹⁴ Cela change le sens même de l'expression « gain de main-d'œuvre » : réduire les heures de travail ne crée pas automatiquement un meilleur processus. Les questions essentielles sont : à qui profitent les économies réalisées ? Qui accomplit les tâches restantes ? Qui est responsable lorsque le système tombe en panne ?

La répartition des tâches

Un métier dans son ensemble ne devrait pas être classé comme uniquement humain ou uniquement robotique. Les tâches peuvent être réparties : une machine peut soulever un élément, tandis qu'une personne l'aligne, vérifie l'assemblage ou modifie le plan. La répartition des tâches est une décision technique et sociale. Le travail dangereux doit-il rester humain simplement parce que la main-d'œuvre coûte moins cher que l'automatisation ? Qui gagne en contrôle lorsque le processus devient numérique ? De qui le temps, le savoir et le risque sont-ils pris en compte dans ce calcul ?

La question centrale n'est pas de savoir si le robot est plus rapide. Il s'agit plutôt de savoir si le système, dans son ensemble, produit un résultat qui en vaut la peine, avec moins de ressources au total, moins de risques, et de meilleures conditions de travail.

Un processus de construction ne peut être considéré comme performant si ses bénéfices reposent sur la dissimulation de la préparation, le déplacement des risques, ou l'exclusion d'impacts qui échappent au cycle immédiat du robot.

14. Rosen, Patricia Helen, Eva Heinoold, Elena Fries-Tersch, and Sascha Wischniewski. *Advanced Robotics and Automation: Implications for Occupational Safety and Health, Summary*. European Agency for Safety and Health at Work, 2022



*Robot cutting after scan
of exact. Re:Config,
Dalila Romero Zenker,
CRCL, EPFL 2026*

Are robots allowed to fail?

Les robots ont-ils le droit d'échouer?

EN

A construction robot does not have to be mechanically broken to malfunction. It can act on incorrect information, lose track of an object, misinterpret a sensor signal, or enter a workspace that has changed. Power failures, software errors, communication problems, incorrect installation and human error can all create unsafe conditions.^{15,16} Robots do fail. But how failure is detected, how people are protected, what information the machine provides, and how construction can recover afterwards is the question.

When reality differs from the model

Industrial robots have traditionally operated in organised environments, where materials, positions and sequences are carefully controlled. Construction sites offer fewer certainties. Components may be installed outside tolerance. Materials may bend or behave differently to how they are expected to. Dust, weather and uneven ground can interfere with sensing. Although cameras, laser scanners and proximity sensors help a

FR

Un robot peut dysfonctionner au-delà d'une panne mécanique. Il peut agir à partir d'informations erronées, perdre la trace d'un objet, mal interpréter un signal ou pénétrer dans un environnement qui a changé. Coupures de courant, erreurs logicielles, problèmes de communication, installation incorrecte et erreur humaine créent alors des conditions dangereuses.^{15,16} Les robots tombent en panne. La question est de savoir comment la défaillance est détectée, comment les personnes sont protégées et comment la construction peut reprendre.

Quand la réalité s'écarte du modèle

Les robots industriels ont traditionnellement opéré dans des environnements organisés, où matériaux, positions et séquences sont soigneusement contrôlés. Les chantiers offrent moins de certitudes. Des éléments peuvent être installés hors tolérance. Les matériaux peuvent se déformer ou se comporter différemment de ce qui était prévu. Poussière, intempéries et sol irrégulier perturbent la détection. Bien que caméras, scanners laser

15. Earnest, G. Scott, Douglas B. Trout, Ci-Jyun Liang, and Asa Castleberry. "Robotics and Automation Safety Risks in Construction." *Frontiers in Built Environment*, published 9 February 2026

16. Occupational Safety and Health Administration. "Industrial Robot Systems and Industrial Robot System Safety." *OSHA Technical Manual*, Section IV, Chapter 4, updated 2021

robot observe its surroundings, sensing does not produce perfect knowledge. Objects can be hidden, measurements can be inaccurate, and the controller may not know whether its next movement will be safe. What should the robot do when it cannot determine this with sufficient confidence? It may slow down, increase the distance between itself and a person, enter a monitored stop, or stop completely. In such situations, stopping is not necessarily an indication that the robot is badly designed. It may be the correct response to uncertainty.^{17, 18, 19}

Separation and shared space

The simplest way to reduce the risk of collisions is to keep people and robots apart. This separation can be spatial or temporal. In this case, people and robots use the same space, but not at the same time. A monitored stop keeps the machine stationary while a person enters the space.¹⁹

Working simultaneously in a shared space is more demanding. Safety must be assessed across the entire application, not just the robotic arm. Tools, payloads, sensors, software, stopping performance, surrounding equipment, maintenance procedures and expected human behaviour all affect the risk. While an emergency stop remains essential, it cannot replace risk reduction through design, safeguarding, training and clear operating procedures.^{18, 19} Some systems may dynamically detect and respond to people and changing conditions may offer new possibilities, but they also raise questions about monitoring, reliability and how much responsibility can be placed on automated systems.

et capteurs aident un robot à observer son environnement, la détection ne produit jamais une connaissance parfaite. Des objets peuvent être cachés, des mesures peuvent être imprécises, et le contrôleur peut ne pas savoir si son prochain mouvement sera sûr. Que doit faire le robot lorsqu'il ne peut établir cela avec une confiance suffisante ? Il peut ralentir, augmenter la distance qui le sépare d'une personne, entrer dans un état d'arrêt surveillé, ou s'arrêter complètement. Dans ce type de situation, s'arrêter n'est pas nécessairement le signe d'une mauvaise conception : cela peut être la réponse appropriée à l'incertitude.^{17, 18, 19}

Séparation et espace partagé

Le moyen le plus simple de réduire le risque de collision est de séparer personnes et robots, spatialement ou temporellement. Un arrêt surveillé immobilise la machine dès qu'une personne entre dans l'espace.¹⁹

Travailler simultanément dans un espace partagé est plus exigeant. La sécurité doit être évaluée pour l'ensemble de l'application, pas seulement le bras robotisé: outils, charges, capteurs, logiciels, freinage, équipements environnants, maintenance et comportement humain attendu influencent le niveau de risque. L'arrêt d'urgence reste essentiel mais ne remplace pas la réduction du risque par la conception, la protection, la formation et des procédures claires.^{18, 19} Certains systèmes détectent dynamiquement les personnes et réagissent aux conditions changeantes, ouvrant de nouvelles possibilités tout en soulevant des questions de surveillance, de fiabilité et de responsabilité confiée aux systèmes automatisés.

17. Parascho, Stefana. "Construction Robotics: From Automation to Collaboration." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 6, 2023, pp. 183–204

18. Earnest, G. Scott, Douglas B. Trout, Ci-Jyun Liang, and Asa Castleberry. "Robotics and Automation Safety Risks in Construction." *Frontiers in Built Environment*, published 9 February 2026

19. Occupational Safety and Health Administration. "Industrial Robot Systems and Industrial Robot System Safety." *OSHA Technical Manual*, Section IV, Chapter 4, updated 2021

What types of robotic systems do we need to develop to enable safe human-robot collaboration at the scale and complexity of construction?

Recovery is different from stopping

A safe stop eliminates the immediate hazard. However, it does not necessarily resume construction. It may be necessary for someone to inspect the tool, verify the workspace, correct the digital model, reposition a component, or change the construction sequence. The work may need to continue manually or move to another area. Therefore, a resilient workflow asks more than: how rarely does the robot break? It also asks: can workers identify common problems? Are spare parts and specialist knowledge available? Can another part of the project continue? Is the system still operable when the original developer is absent? Can the task be completed using an alternative method?

A local fault should not disable the entire construction process. Experimental adaptive projects, such as *ReConfig*, recognise that not all physical conditions can be known in advance, so they deliberately retain human judgement within the workflow.²⁰

A robotic system needs to distinguish between a variation it can safely accommodate and a situation in which it should no longer continue. Designing for failure does not mean accepting accidents as inevitable. It means asking in advance: how might the system fail? How will the failure be detected? What will stop the robot? How will people understand what has happened? Who can intervene? How can work resume safely?

Quels systèmes robotiques faut-il développer pour permettre une collaboration humain-robot sûre, à l'échelle et à la complexité propres à la construction?

La reprise diffère de l'arrêt

Un arrêt sécurisé élimine le danger immédiat, mais ne permet pas nécessairement de reprendre la construction. Il peut falloir inspecter l'outil, vérifier l'espace de travail, corriger le modèle numérique, repositionner un élément, ou modifier la séquence. Le travail peut devoir se poursuivre manuellement, ou ailleurs. Un processus résilient ne se limite donc pas à « à quelle fréquence le robot tombe-t-il en panne ? ». Il pose aussi : le personnel peut-il identifier les problèmes ? Les pièces et le savoir spécialisé sont-ils disponibles ? Une autre partie du projet peut-elle avancer ? Le système reste-t-il opérable sans ses concepteurs d'origine ? La tâche peut-elle s'achever autrement ?

Une défaillance locale ne devrait pas paralyser l'ensemble du processus. Des projets expérimentaux adaptatifs, comme *ReConfig*, reconnaissent que toutes les conditions physiques ne peuvent être connues à l'avance, c'est pourquoi ils maintiennent délibérément le jugement humain au cœur du processus.²⁰

Un système robotique doit distinguer une variation qu'il peut accommoder en sécurité d'une situation où il doit s'arrêter. Concevoir en prévision de la défaillance ne signifie pas accepter les accidents comme inévitables, mais se demander en amont : comment le système pourrait-il défaillir ? Comment la défaillance sera-t-elle détectée ? Qu'est-ce qui arrêtera le robot ? Qui peut intervenir ? Comment reprendre le travail en sécurité ?

20. CRCL and SXL, EPFL. *ReConfig: Human-Robot Adaptive Workflows for Disassembly, Repair, and Construction*. Public project documentation, 2026

Designing for failure does not mean
accepting accidents as inevitable.
It means asking in advance:
how might the system fail? What
will stop the robot?

Concevoir en tenant compte de l'échec
ne signifie pas accepter les accidents
comme une fatalité. Cela signifie se
demander à l'avance: comment le système
pourrait-il échouer? Qu'est-ce qui
arrêtera le robot?

Craft vs efficiency?

L'artisanat vs le rendement?

EN

Craft and industry are often presented as opposites. Craft suggests material knowledge judgement and the freedom to make adjustments while working. Industry suggests speed standardisation and repetition.

Robotics does not automatically reconcile these two concepts. While it can support a new relationship between craft and industry, it can also make work more rigid and transfer skills to software inaccessible for most people.

It's not hand versus machine. Craft has never meant working without technology. Craftspeople use machines, templates and measuring devices. What distinguishes craft is not the absence of tools, but the ability to read a situation, respond to a material, and adapt as the work progresses.

Meanwhile, industrial production does not necessarily involve producing thousands of identical objects. A programmable robot can repeat an operation accurately while adapting its movements for each component. The difficulty lies in the direction of information. In a conventional automated process, a completed digital model is used as a starting point. The materials, tools and machines are then expected to follow this model. Any variation from the plan appears as an error.

FR

L'artisanat et l'industrie sont souvent présentés comme des opposés. L'artisanat évoque le savoir de la matière et la liberté d'ajuster son geste en cours de travail. L'industrie évoque la standardisation et la répétition.

La robotique ne réconcilie pas automatiquement ces deux notions. Si elle peut favoriser une nouvelle relation entre artisanat et industrie, elle peut aussi rigidifier le travail et transférer les savoir-faire vers des logiciels inaccessibles à la plupart des gens.

Ce n'est pas la main contre la machine. L'artisanat n'a jamais signifié travailler sans technologie. Les artisans utilisent des machines, des gabarits et des instruments de mesure. Ce qui distingue l'artisanat n'est pas l'absence d'outils, mais la capacité à lire une situation, à réagir à un matériau et à s'adapter au fil du travail.

De son côté, la production industrielle n'implique pas nécessairement de produire des milliers d'objets identiques. Un robot peut répéter une opération avec précision tout en adaptant ses mouvements. La difficulté réside dans le sens de circulation de l'information. Dans un processus automatisé conventionnel, un modèle numérique achevé sert de point de départ ; les matériaux, outils et machines sont censés s'y conformer. Tout écart au plan apparaît comme une erreur. Un processus

A craft-based process works differently. What happens during fabrication can influence the next decision.

For robotics to support craft, information must therefore go in both directions: the digital model guides the work, but the material result can also modify the model, sequence or objective.²¹

Designing with What Is Available

Truss from Trash uses irregular timber offcuts instead of standardised lumber. A projection-based interface places digital information directly on the worktable. Through these tangible controls, users can modify the geometry, arrangement, and material assignments as the truss develops.²² The robot is not expected to imitate a carpenter. The person evaluates and modifies the design, while the machine undertakes repetitive, precise or potentially hazardous operations. Efficiency does not come from making every piece identical but from creating a process capable of using pieces that are already different.

Cutting by robot, shaping by hand

Crafted by hand and machine introduces another form of collaboration between human craft and robotic fabrication. Naturally curved timber is processed using a combination of robotic cutting and manual wood-hewing techniques. The robot does structural joints and guide cuts. A craftsperson then removes material with an axe, responding directly to the grain and irregular form of each beam.

The research used curved hardwood recovered from local park maintenance to construct a full-scale proto-

artisanal fonctionne différemment : ce qui se produit pendant la fabrication influence la décision suivante.

Pour que la robotique soutienne l'artisanat, l'information doit circuler dans les deux sens : le modèle numérique guide le travail, mais le résultat matériel peut, en retour, modifier le modèle, la séquence ou l'objectif.²¹

Concevoir avec ce qui est disponible

Truss from Trash utilise des chutes de bois irrégulières plutôt que du bois standardisé. Une interface par projection place l'information numérique directement sur le plan de travail. Grâce à ces commandes tangibles, les utilisateur·rice·x peuvent modifier la géométrie, l'agencement et l'attribution des matériaux à mesure que la ferme de charpente prend forme.²² Le robot n'imité pas le métier de charpentier. La personne évalue et modifie la conception, tandis que la machine se charge des opérations répétitives, précises ou potentiellement dangereuses. L'efficacité ne vient pas du fait de rendre chaque pièce identique, mais de la création d'un processus capable d'utiliser des pièces déjà différentes entre elles.

Découpe robotisée, façonnage à la main

Crafted by Hand and Machine introduit une autre forme de collaboration entre artisanat et fabrication robotisée. Du bois naturellement courbé est travaillé grâce à une combinaison de découpe robotisée et de techniques manuelles de taille du bois. Le robot réalise les assemblages structurels et les coupes de guidage. Un·e artisan·e·x retire ensuite la matière à la hache, en réagissant directement au fil du bois et à la forme irrégulière de chaque poutre.

21. Parascho, Stefana. "Construction Robotics: From Automation to Collaboration." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 6, 2023, pp. 183–204

22. Skevaki, Eleni, Eric Duong, Hong-Bin Yang, and Stefana Parascho. "Truss from Trash: A Human-Robot Framework for Adaptive Timber Assembly on the Construction Floor." *Construction Robotics*, vol. 10, 2026, article 2

type.²³ While robotic cutting provides geometric accuracy, manual hewing responds to material behaviour that is difficult to describe in a digital model. The result is neither simply handmade nor machine-made. It is organised around two forms of knowledge that cannot easily be reduced to one another.

Where does the skill go?

A process that values human judgement may give workers no access to the code, no authority to alter the sequence, and no understanding of why the machine behaves as it does. Therefore, a meaningful relationship between craft and industry depends on more than just technical performance. Can the people fabricating the structure understand and modify the process? Can they interrupt or correct the machine? Does the system respond to material conditions or reject anything that does not match its model? Are dangerous operations reduced or merely transferred elsewhere? Does the technology expand workers' practical knowledge, or make them dependent on inaccessible software and specialists?

The most viable future may not be a fully automated construction site, but an environment in which digital and manual tools are selected according to their respective strengths, capable of producing variation with minimal waste. A construction process that expands human craftsmanship instead of removing its control.

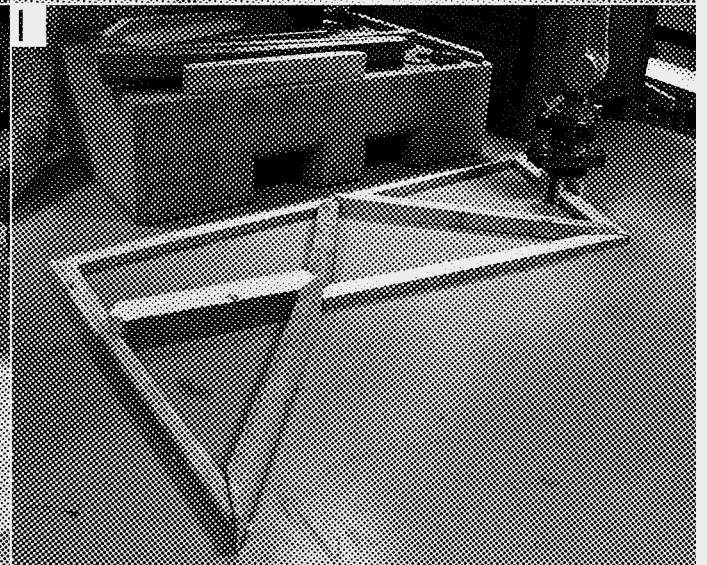
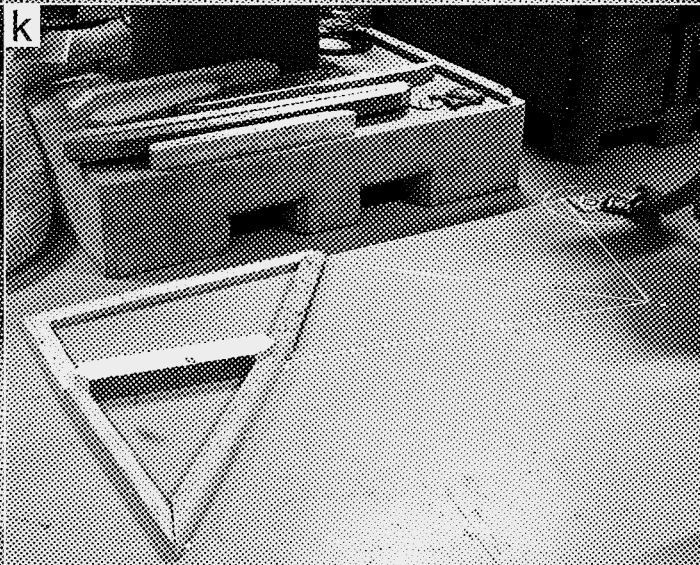
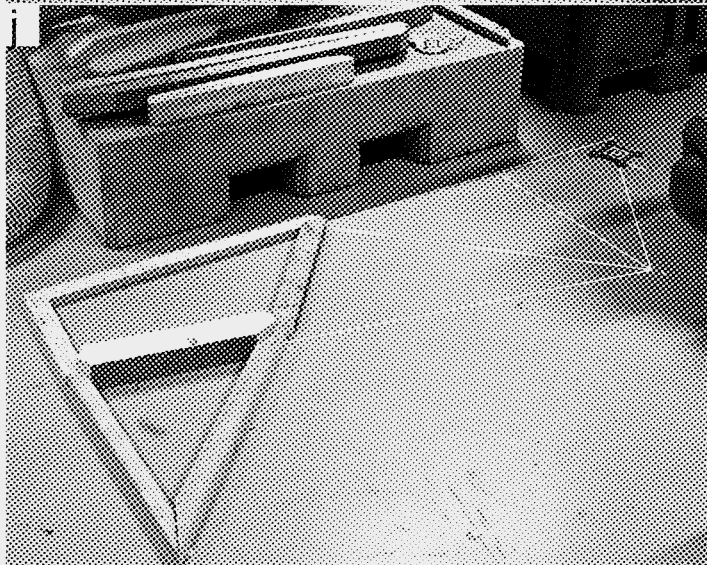
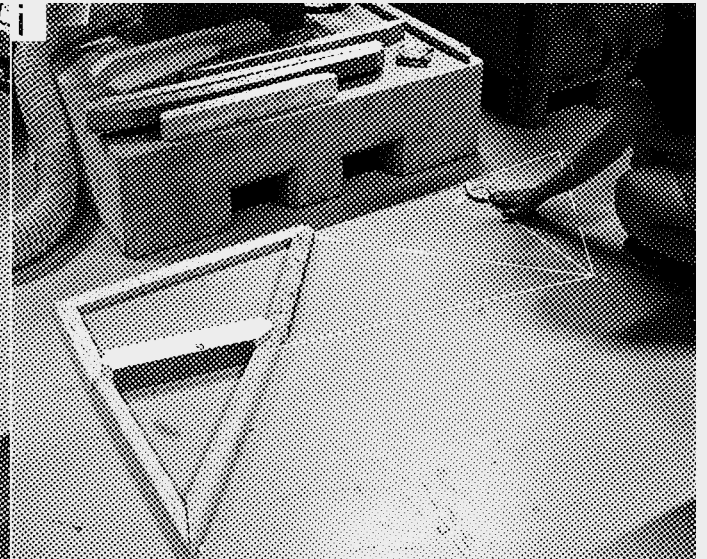
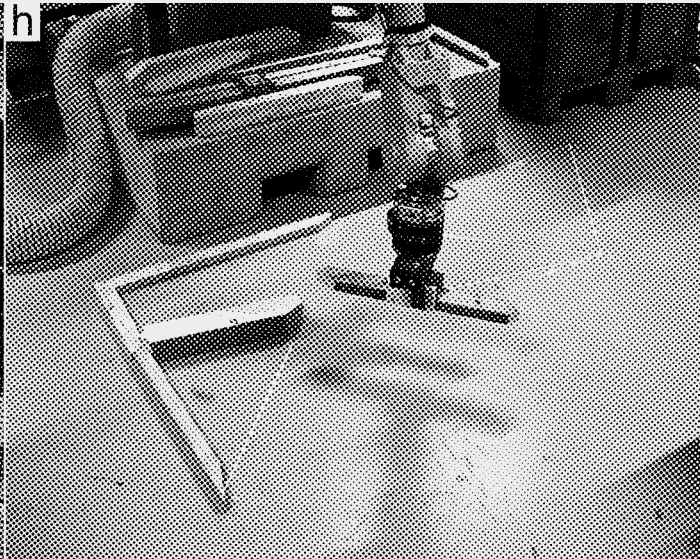
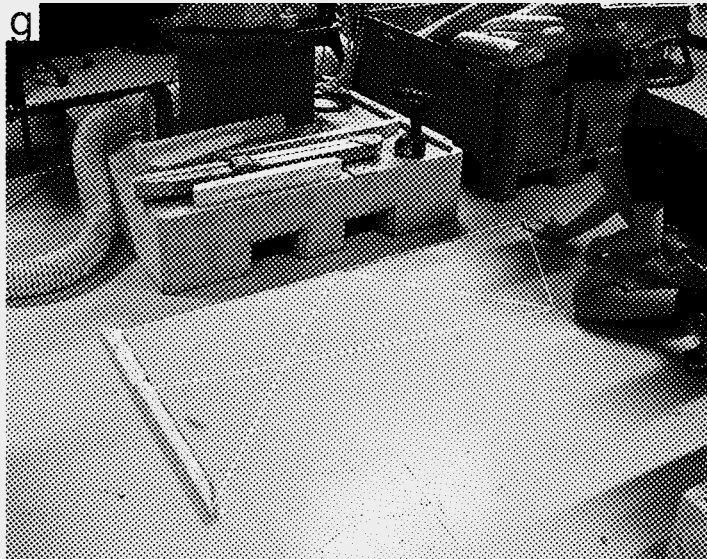
La recherche a utilisé du bois dur courbé, récupéré lors de l'entretien de parcs, pour construire un prototype à échelle réelle.²³ Si la découpe robotisée assure la précision géométrique, le façonnage manuel répond à un comportement du matériau difficile à décrire dans un modèle numérique. Le résultat n'est ni purement manuel, ni purement mécanique. Il s'organise autour de deux formes de savoir.

Où va le savoir-faire ?

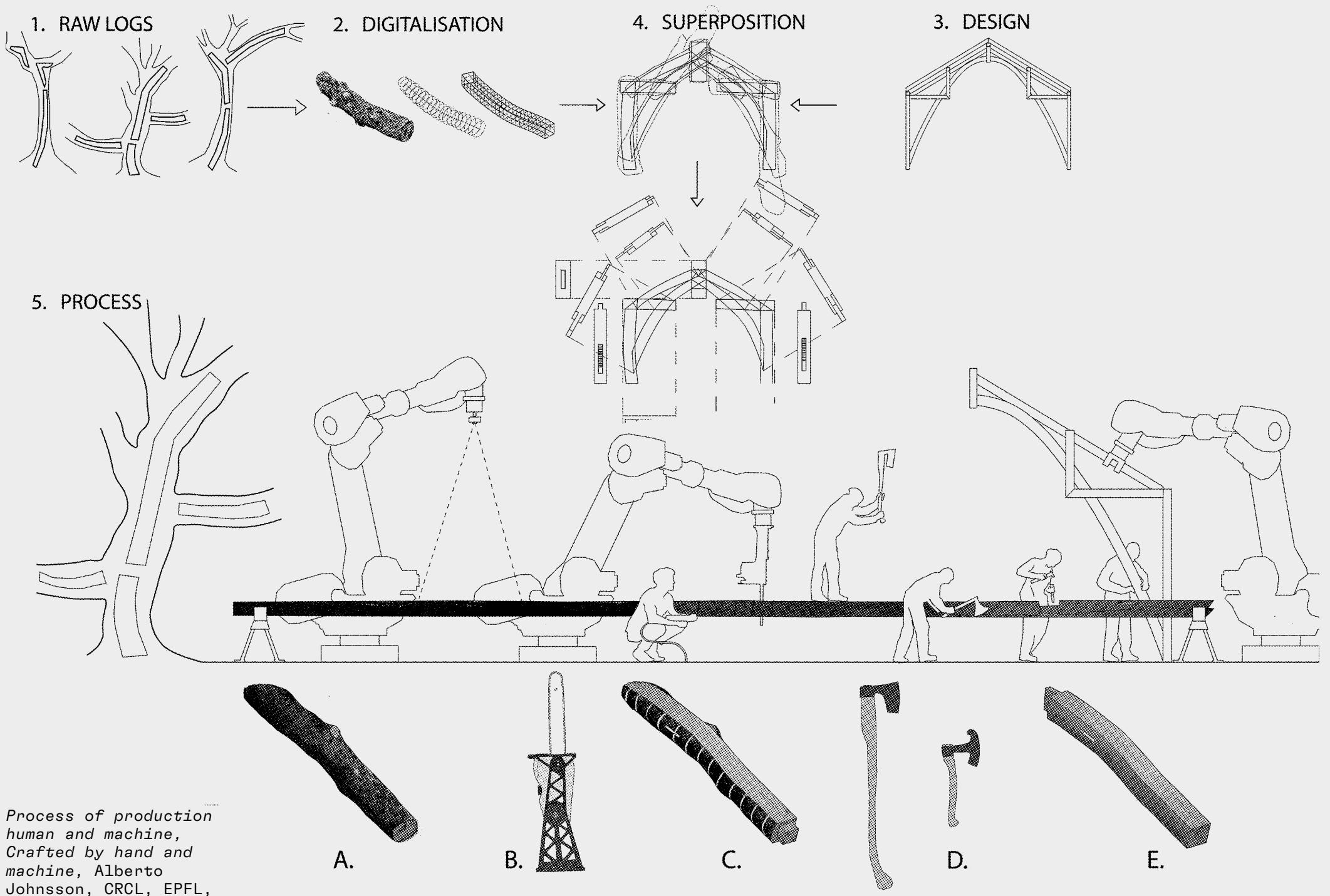
Un processus qui valorise le jugement humain peut, dans les faits, ne donner au personnel aucun accès au code, aucune autorité pour modifier la séquence, et aucune compréhension du comportement de la machine. Une relation véritable entre artisanat et industrie dépend de bien plus que de la seule performance technique. Les personnes qui fabriquent la structure peuvent-elles comprendre et modifier le processus ? Peuvent-elles interrompre ou corriger la machine ? Le système réagit-il aux conditions du matériau, ou rejette-t-il tout ce qui ne correspond pas à son modèle ? Les opérations dangereuses sont-elles réduites, ou simplement déplacées ailleurs ? La technologie élargit-elle le savoir pratique du personnel, ou le rend-elle dépendant de logiciels et de spécialistes-x inaccessibles ?

L'avenir le plus viable n'est peut-être pas un chantier entièrement automatisé, mais un environnement où outils numériques et manuels sont choisis selon leurs forces respectives, capable de produire de la variation avec un minimum de gaspillage. Un processus de construction qui élargit le savoir-faire humain, plutôt que de lui retirer son contrôle.

23. Johnsson Alvarez, Alberto, Eleni Skevaki, Marirena Kladeftira, and Stefana Parascho. "Crafted by Hand and Machine: Human-Robot Fabrication Workflow for the Use of Curved Wood in Construction." *Proceedings of eCAADe 2025*, 2025



*Step by step process
of the creation of
a truss. Truss from
trash, Eleni Skevaki,
Eric Duong, CRCL, EPFL,
2025*



Process of production
human and machine,
Crafted by hand and
machine, Alberto
Johnsson, CRCL, EPFL,
2025

It's not hand versus machine. Craft has never meant working without technology. Craftspeople use machines, templates and measuring devices. What distinguishes craft is not the absence of tools, but the ability to read a situation, respond to a material, and adapt as the work progresses.

Ce n'est pas la main contre la machine. L'artisanat n'a jamais signifié travailler sans technologie. Les artisan-e-s utilisent des machines, des gabarits et des instruments de mesure. Ce qui distingue l'artisanat, ce n'est pas l'absence d'outils, mais la capacité à lire une situation, à réagir à un matériau et à s'adapter au fil du travail.

Agency, authorship and automation

Agentivité, droit d'auteur et automatisations

EN

In robotic construction most workflows follow a linear process. The building is designed first. Its components are arranged, the assembly sequence is determined, and each action is translated into robotic movements. The robot executes the plan precisely, but does not decide what the structure should become.

Fixed process

Complete design → position of components →
construction sequence → robot movements →
finished structure

A robot cannot build without direction. It can, however, build without following a complete blueprint in which every component and movement has been fixed in advance. In an adaptive process humans define the objective, available materials, geometric limits, structural requirements and actions the robot is permitted to perform. The system then selects an action in response to what has already been built. It places an element, evaluates the result and chooses again.

FR

Dans la construction robotisée, la plupart des processus suivent une logique linéaire : le bâtiment est conçu, ses composants disposés, la séquence d'assemblage établie, puis chaque action traduite en mouvements robotisés. Le robot exécute le plan avec précision, mais ne décide pas de ce que la structure doit devenir.

Processus fixe

Conception achevée → position des composants →
séquence de construction → mouvements du robot →
structure achevée

Un robot ne peut pas construire sans direction, mais il peut construire sans suivre un plan complet où chaque composant et mouvement seraient fixés à l'avance. Dans un processus adaptatif, les humains définissent l'objectif, les matériaux disponibles, les limites géométriques, les exigences structurelles et les actions autorisées. Le système choisit alors une action en réponse à ce qui a déjà été construit : il place un élément, évalue le résultat, puis choisit à nouveau.

Adaptive process
Goal and constraints → robotic action → evaluation
→ next action → emerging structure

The plan is no longer a finished drawing, instead it becomes a process of action, evaluation and adjustment. The robot redistributes the plan.

Building one decision at a time

Robotoddler investigates reinforcement learning for the assembly of architectural structures by multiple robots. In the simulation, the robotic agents practise actions such as picking up, moving, placing and holding elements. Successful actions are rewarded, while unsuccessful ones are discouraged. The research project aims to transfer learned assembly strategies from simulation to physical robotic systems.²⁸

Multi-agent Reinforcement Learning for Robotic Construction similarly uses reinforcement learning to select placements while considering stability and robotic construction constraints. Two generated structures were later assembled using collaborating robotic arms.²⁹ This is not an uncontrolled trial-and-error process on a construction site. Training takes place in a simulation environment with a limited range of materials, movements and evaluation criteria. The robots are not free to build whatever they want. Designers decide which actions are possible and what constitutes success. A placement might be rewarded if the structure remains stable, if components do not collide, if the robot can reach the required position, and if construction advances towards its objective. Changing those rules results in a different structure.

Processus adaptatif
Objectif et contraintes → action robotisée →
évaluation → action suivante → structure émergente

Le plan n'est plus un dessin achevé ; il devient un processus d'action, d'évaluation et d'ajustement. Le robot redistribue le plan.

Construire une décision à la fois

Robotoddler étudie l'apprentissage par renforcement pour l'assemblage de structures architecturales par plusieurs robots. Dans la simulation, les agents robotiques s'exercent à des actions telles que saisir, déplacer, poser et maintenir des éléments. Les actions réussies sont récompensées, les échecs découragés. Le projet de recherche vise à transférer les stratégies d'assemblage apprises en simulation vers des systèmes robotiques physiques.²⁸

Multi-agent Reinforcement Learning for Robotic Construction utilise l'apprentissage par renforcement pour sélectionner les placements selon la stabilité et les contraintes de la construction robotisée. Deux structures générées sont assemblées à l'aide de bras robotisés collaboratifs.²⁹ Il s'agit d'une simulation hors chantier, avec un éventail limité de matériaux, de mouvements et de critères d'évaluation. Les robots ne sont pas libres de construire ce qu'ils veulent — les humains décident des actions possibles et des critères de réussite. Un placement est récompensé si la structure reste stable, si les composants n'entrent pas en collision, si la position requise est atteinte, et si la construction progresse vers son objectif. Modifier ces règles produit une structure différente.

28. Swiss Data Science Center and EPFL Creative Computation Lab. *Robotoddler: Autonomous Robotic Assemblies*. Ongoing research project and public project description

29. Vallat Gabriel, Jingwen Wang, Anna Maddux, Maryam Kamgarpour, and Stefana Parascho. "Reinforcement Learning for Scaffold-Free Construction of Spanning Structures". *Proceedings of the ACM Symposium on Computational Fabrication – SCF'23, 2023*

Who designed the result?

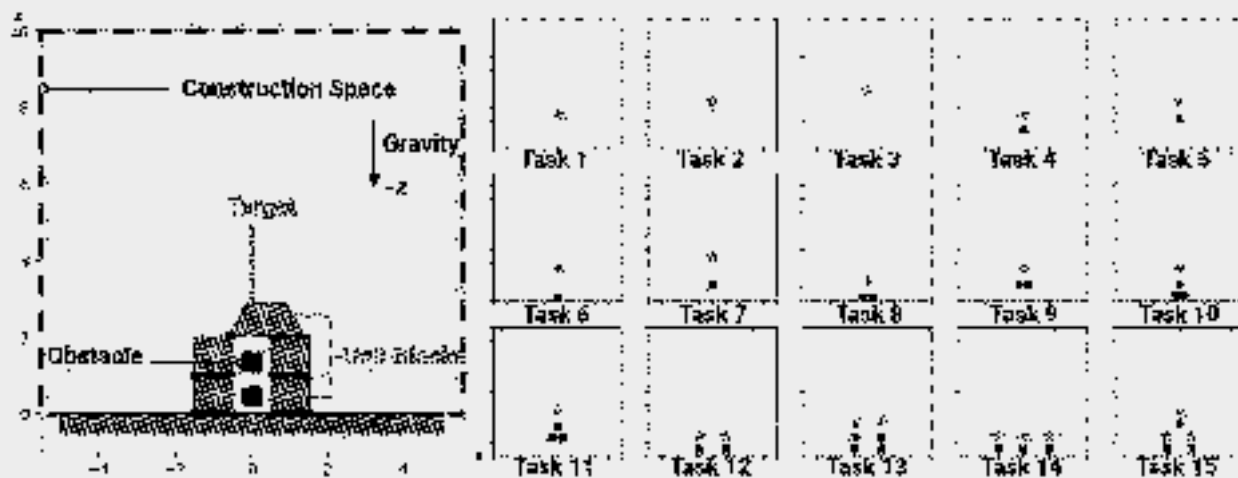
When a robot selects the position and sequence of elements, it immediately affects the structure's form. Whether this makes it partially a designer depends on how we define design. The robot acts within a field of possibilities: it has limited agency, making choices that shape what happens next, but no intentions, values, or independent reason for building. It doesn't decide why the structure should exist, who it should serve, or which risks are acceptable ; it chooses among permitted actions without setting the task's purpose or limits. The designer may draw less of the final object and more of the process through which the result emerges, increasingly establishing goals, rules, and boundaries ; designing not just an object, but how a system is allowed to choose. Authorship may be distributed, but not equally.

An adaptive construction process can respond to conditions that are difficult to predict. It can adapt to irregular materials, revise an assembly in the event of an unexpected change, or identify forms that satisfy structural and robotic constraints. When a structure develops through a sequence of partially automated decisions, how can its safety be verified before completion? Can a person understand why the system selected a particular action? Who can intervene, reject a decision or stop the process? Who is responsible if the outcome is unsafe or undesirable? The challenge is therefore not to choose between complete human control and complete robotic independence. Rather, it is to determine which decisions can be delegated, under what conditions, and what form of supervision is required.

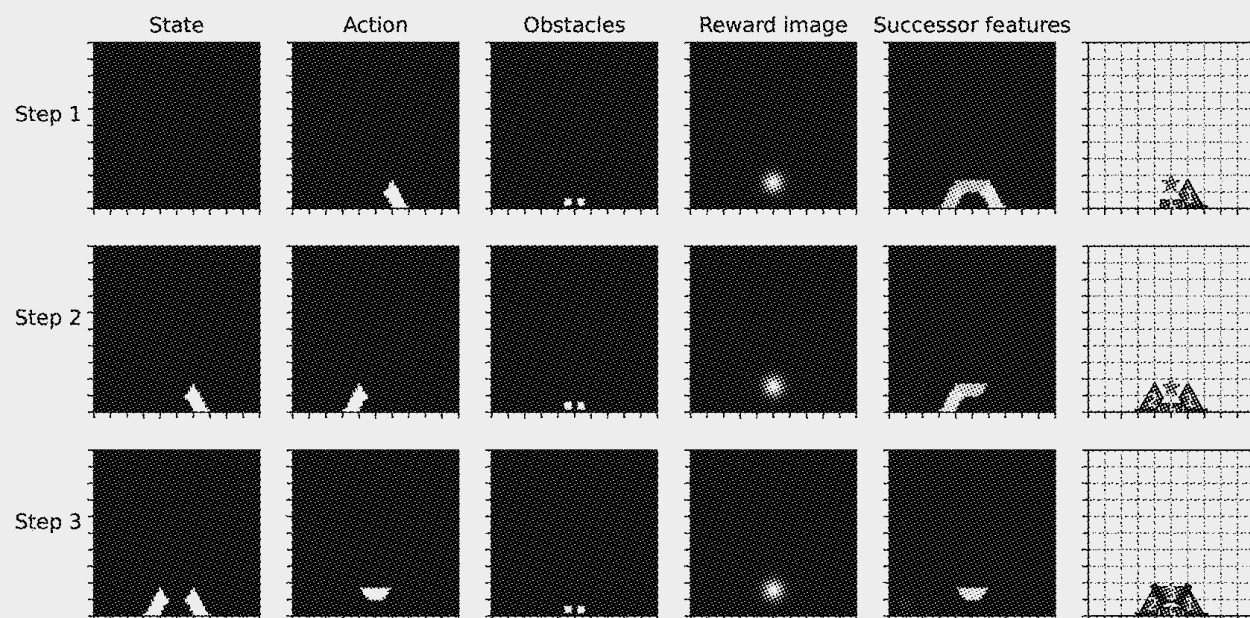
Qui a conçu le résultat ?

Lorsqu'un robot choisit la position et la séquence des éléments, cela affecte immédiatement la forme de la structure. Que cela fasse de lui un concepteur dépend de la façon dont on définit l'acte de concevoir. Le robot agit dans un champ de possibilités : il dispose d'une agencivité limitée, faisant des choix qui influencent la suite, mais sans intentions, valeurs, ni raison propre de construire. Il ne décide ni pourquoi la structure doit exister, ni à qui elle doit servir, ni quels risques sont acceptables — il choisit parmi des actions permises, sans en fixer la finalité ni les limites. Le-la designer dessine peut-être moins l'objet final et conçoit davantage le processus dont le résultat émerge, établissant de plus en plus des objectifs, des règles et des limites — concevant un objet, et en même temps la manière dont le système est autorisé à choisir. La paternité de l'œuvre peut être distribuée, mais de manière égale.

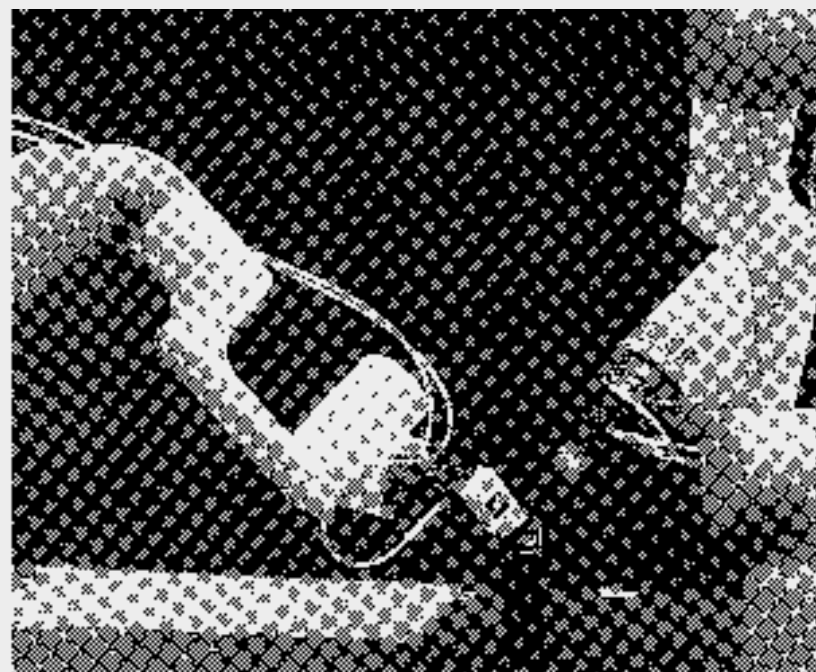
Un processus de construction adaptatif peut répondre à des conditions difficiles à prévoir : s'adapter à des matériaux irréguliers, réviser un assemblage en cas de changement imprévu, ou identifier des formes satisfaisant aux contraintes structurelles. Lorsqu'une structure se développe à travers une séquence de décisions partiellement automatisées, comment vérifier sa sécurité avant achèvement ? Peut-on comprendre pourquoi le système a sélectionné une action donnée ? Qui peut intervenir dans le processus ? Qui est responsable si le résultat est dangereux ? Le défi n'est pas de choisir entre contrôle humain total et indépendance robotique, mais de déterminer quelles décisions peuvent être déléguées et sous quelles conditions.



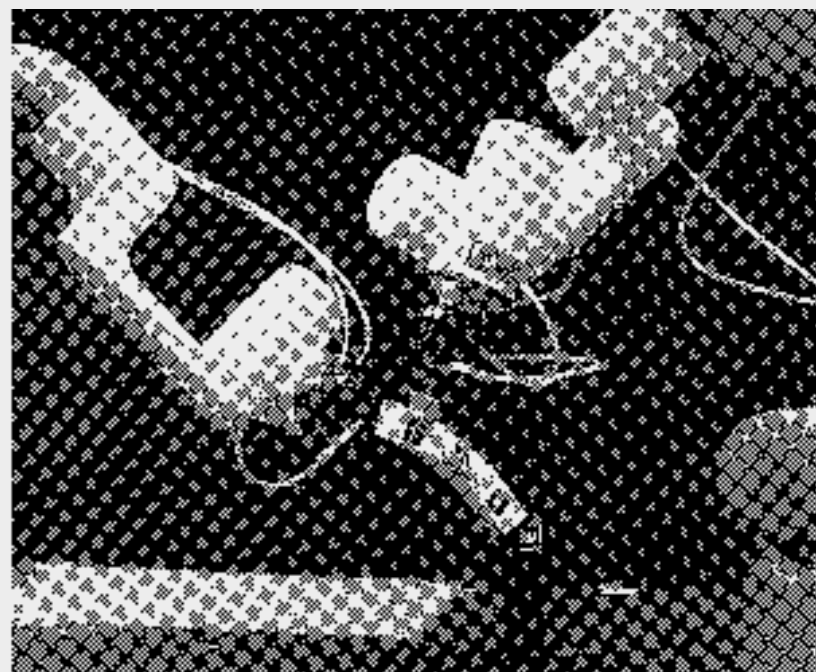
Left: Problem Definition: Example of a construction task, defined by the construction space, target locations, obstacle regions, and available unit blocks. Right: Tasks: A set of 15 tasks used to evaluate the reinforcement learning approach; Robotoddler, Jingwen Wang, CRCL, EPFL 2026



Example of episode run of 'Task 8'. Robotoddler, Jingwen Wang, CRCL, EPFL 2026



Construction process using two robots. One robot places a block and the second robot supports it. After each placement, the camera captures the block positions, and the policy computes the next block's target location. Learning to build covering structures with continuous adjustments, Gabriel Vallat, CRCL, EPFL 2026



There is no automatic justification for using a robot in construction. The value of robotics lies in what it enables that would otherwise be difficult, unsafe or impractical to achieve.

Il n'existe aucune justification automatique au recours à un robot dans la construction. La valeur de la robotique réside dans ce qu'elle rend possible, là où l'objectif serait autrement difficile, dangereux ou impraticable à atteindre.



*Sourcing, Rising from
Rubble, Maxence
Grangeot, CRCL & SXL,
EPFL 2024*

Save the planet?!

Les robots vont-ils sauver la planète?

EN

A robot is not inherently sustainable just because it is precise, digital or automated. Its environmental value depends on what the entire process enables us to avoid, preserve or reuse, and whether the benefits outweigh the equipment and energy involved. Globally, buildings account for around 32% of energy use and 34% of carbon dioxide emissions.³⁰ In the European Union, meanwhile, the built environment accounts for around half of all extracted materials, while construction generates over 35% of total waste.³¹ Robotics only affect part of this system but it cannot compensate for unnecessary demolition, excessive material use, or unlimited demand for new construction.

Working with what the industry rejects

Reclaimed materials are different. Concrete fragments have irregular outlines. Timber members may be warped. The dimensions, connections and material conditions of each piece vary. Processes designed for uniform components often reject this variation, requiring materials to be crushed, cut or heavily reprocessed before they can be used again.

Rising from Rubble takes a different approach. Large concrete fragments from demolition are photographed

FR

Un robot n'est pas durable en soi du simple fait d'être précis, numérique ou automatisé. Sa valeur environnementale dépend de ce que le processus permet d'éviter, de préserver ou de réutiliser, et de si ces bénéfices l'emportent sur l'énergie et les équipements requis. À l'échelle mondiale, les bâtiments représentent environ 32% de la consommation d'énergie et 34% des émissions de dioxyde de carbone.³⁰ Dans l'UE, le bâti représente près de la moitié des matériaux extraits, tandis que la construction génère plus de 35% des déchets totaux.³¹ La robotique agit sur une partie de ce système, mais elle ne peut compenser les démolitions, la surconsommation ou la demande illimitée de nouvelles constructions.

Travailler avec ce que l'industrie rejette

Les matériaux réemployés sont différents. Les débris de béton ont des contours irréguliers. Les pièces de bois peuvent être voilées. Les dimensions, les assemblages et l'état de chaque élément varient. Les processus conçus pour des composants uniformes rejettent cette variation, exigeant que les matériaux soient concassés, découpés ou fortement retraités avant de pouvoir être réutilisés.

Rising from Rubble adopte une approche différente. Les gros débris de béton issus de démolitions sont pho-

30. United Nations Environment Programme and Global Alliance for Buildings and Construction. *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025*. UNEP, 2025

31. European Commission. *Buildings and Construction*. Current public guidance on material extraction and construction waste in the European Union

and measured. A robotically operated hammer drill prepares the lifting points, and a sensor-equipped crane helps to orient and assemble the pieces into walls. This project does not replace every familiar construction tool with a purpose-built robot. Instead, it adds digital measurement, robotic drilling and computational planning while retaining conventional lifting equipment. The process's environmental impact depends on transport distances, processing, structural performance, supporting equipment, and what would otherwise have happened to the rubble.³²

Keeping buildings and components in use

Avoiding new construction might matter more than fabricating a new component efficiently. Existing buildings and components already embody the resources required for extraction, processing, transportation and assembly.

ReConfig explores how an existing timber structure can be transformed while preserving its material. Rather than dismantling the entire structure and designing a new building from scratch, the project develops the design during construction, adapting it to the actual geometry, condition and structural role of each element.³³ The approach was tested by converting a full-scale timber enclosure into a two-story micro-house. Of the original 63 reclaimed timber members, three were discarded as they were too short, and only two new ones were introduced.³⁴

The environmental potential of this approach does not lie in the robotic movement itself. It comes from enabling selective intervention: retaining structural elements in place, reusing components within the same

tographiés et mesurés. Un marteau-perforateur robotisé prépare les points de levage, et une grue équipée de capteurs aide à orienter et assembler les pièces en murs. Ce projet ne remplace pas chaque outil de chantier familier par un robot conçu sur mesure. Il ajoute plutôt la mesure numérique, le perçage robotisé et la planification computationnelle, tout en conservant l'équipement de levage conventionnel. L'impact environnemental du processus dépend des distances de transport, du traitement, de la performance structurelle, de l'équipement de soutien, et de ce qu'il serait autrement advenu des gravats.³²

Maintenir bâtiments et éléments en usage

Éviter une nouvelle construction compte davantage que fabriquer efficacement un nouvel élément. Les bâtiments et composants existants incarnent déjà les ressources nécessaires à leur extraction, leur traitement, leur transport et leur assemblage.

ReConfig explore comment une structure en bois existante peut être transformée en préservant sa matière, en concevant au fil du chantier plutôt qu'en démantelant tout pour repartir de zéro, et en s'adaptant à la géométrie, l'état et le rôle structurel réels de chaque élément.³³ Testée sur une enceinte en bois à échelle réelle convertie en micro-maison de deux étages, cette approche n'a écarté que 3 des 63 pièces réemployées, pour seulement 2 pièces neuves ajoutées.³⁴

Le potentiel environnemental de cette approche ne réside pas dans le mouvement robotisé, mais dans la possibilité d'une intervention sélective : conserver les éléments structurels en place, réemployer des compo-

32. Grangeot, Maxence, Qianqing Wang, Katrin Beyer, Corentin Fivet, and Stefana Parascho. "Rising from Rubble: Leveraging Existing Construction Tools for Upcycling Concrete Waste into Slender Walls." Open EPFL manuscript, 2024

33. CRCL and SXL, EPFL. *ReConfig: Human-Robot Adaptive Workflows for Disassembly, Repair, and Construction*. Public project documentation, 2026

34. Parascho, Stefana. "Construction Robotics: From Automation to Collaboration." *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 6, 2023, pp. 183-204

new building, and avoiding complete dismantling or replacement. However, the project remains an experimental methodology. It does not yet provide a complete life-cycle comparison with conventional renovation methods. Its environmental value should therefore be understood as a possibility demonstrated through material retention, rather than as proof that robotic construction is inherently more sustainable.

Precision is not a life-cycle assessment.

Robots can cut and position materials accurately. In some processes, this can reduce offcuts, unnecessary thickness and temporary formwork. But optimising one part of a construction process does not necessarily reduce its overall environmental impact. A lightweight component may require energy-intensive fabrication. An optimised structure may be difficult to repair. Combinations of materials may be permanent, which would prevent them from being separated and reused later.

A relevant question is therefore: how much material, energy and equipment did the entire process require to achieve an equivalent result? The assessment should include material extraction and preparation, scanning, computation, tools, supporting equipment, transport, prototypes, failures, construction, maintenance, reuse, and final disposal. The electricity used by robots, compressors, drills, saws, ventilation systems and failed pieces, however, must be counted as a whole.

Robotics is most relevant when it enables construction work in conditions that industrial systems typically reject such as irregular components, demolition rubble, existing joints and buildings that cannot be fully documented.

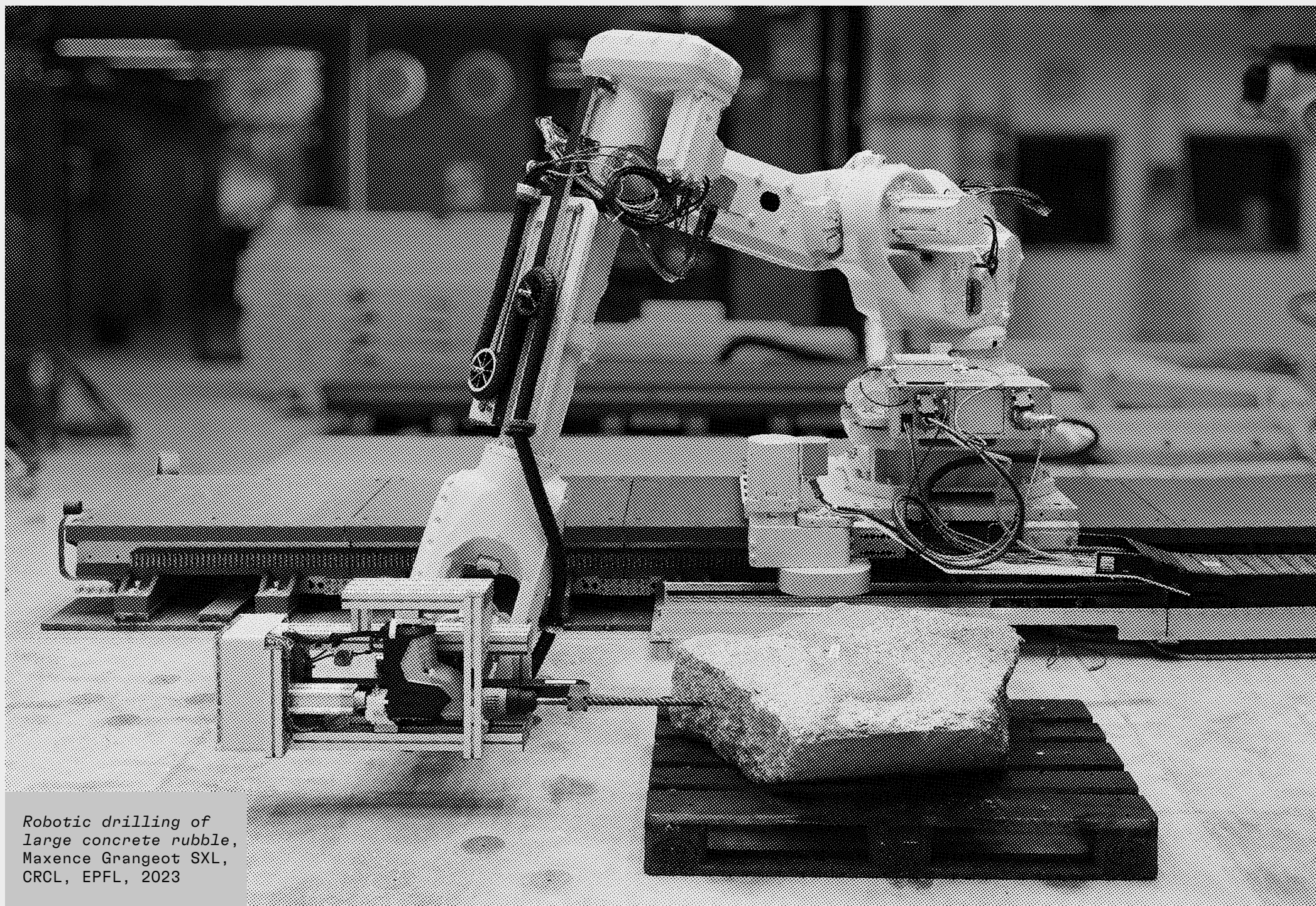
sants au sein d'un bâtiment, et éviter un démantèlement complet. Le projet reste une méthodologie expérimentale, sans comparaison complète du cycle de vie avec les méthodes conventionnelles. Sa valeur environnementale tient à la préservation de la matière démontrée, non à une preuve que la construction robotisée serait, en soi, plus durable.

La précision n'est pas une analyse de cycle de vie

Les robots peuvent découper et positionner les matériaux avec précision, réduisant parfois chutes, épaisseurs superflues et coffrage temporaire. Mais optimiser une partie d'un processus ne réduit pas nécessairement son impact global : un composant léger peut exiger une fabrication énergivore, une structure optimisée peut être difficile à réparer, et des associations de matériaux peuvent devenir permanentes, empêchant séparation et réemploi.

La question pertinente est donc : quelle quantité de matière, d'énergie et d'équipement l'ensemble du processus a-t-il exigée pour un résultat équivalent ? L'évaluation doit inclure extraction, préparation des matériaux, numérisation, calcul, outils, équipement de soutien, transport, prototypes, échecs, construction, maintenance, réemploi et élimination finale — toute l'électricité consommée, des robots aux pièces ratées.

La robotique est la plus pertinente lorsqu'elle permet de travailler dans des conditions que les systèmes industriels rejettent habituellement : composants irréguliers, gravats de démolition, assemblages existants, bâtiments impossibles à documenter entièrement.



*Robotic drilling of
large concrete rubble,
Maxence Grangeot SXL,
CRCL, EPFL, 2023*